

THAÍS CARDOSO ANTUNES

**Análise das patologias de um edifício de concreto armado em cidade litorânea e as suas
devidas intervenções: Um estudo de caso**

Guaratinguetá - SP

2017

Thaís Cardoso Antunes

**Análise das patologias de um edifício de concreto armado em cidade litorânea e as
suas devidas intervenções:**

Um Estudo de Caso

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Prof. Dr. Antonio Wanderley Terni

Orientador

Guaratinguetá - SP

2017

A636a

Antunes, Thaís Cardoso

Análise das patologias de um edifício de concreto armado em cidade litorânea e suas devidas intervenções : um estudo de caso / Thaís Cardoso Antunes – Guaratinguetá, 2017.

98 f. : il.

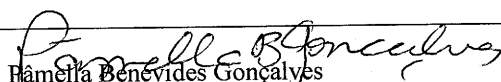
Bibliografia: f. 92-94

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Wanderley Terni

1. Concreto armado 2. Patologia de construção 3. Projeto estrutural
I.Título

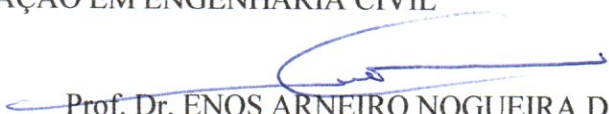
CDU 624.012.45


Pamela Benevides Gonçalves
Bibliotecária CRB/8:9203

THAÍS CARDOSO ANTUNES

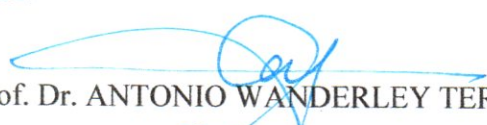
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

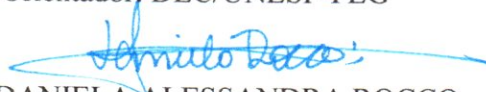

Prof. Dr. ENOS ARNEIRO NOGUEIRA DA SILVA

Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ANTONIO WANDERLEY TERNI

Orientador: DEC/UNESP-FEG


Eng. DANIELA ALESSANDRA ROCCO

Membro Externo


Eng. WILLIAM FÁRIA SHIROMOTO

Membro Externo

Dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, razão da nossa existência, autor e consumidor da minha fé e por meio do qual sou o que sou. A Ele toda honra e glória pela vida e pelas conquistas até aqui alcançadas,

aos melhores pais que uma filha poderia desejar, João e Shirlei, que nunca mediram esforços para me garantir o melhor suporte que puderam oferecer, seja material ou emocional. Vocês são presentes de Deus na minha vida e sempre fontes de exemplo e sabedoria,

à minha querida irmã Melise, companheira para todas as horas, por seu incentivo e opiniões sempre oportunas. Sem você minha vida não teria o mesmo significado,

ao professor Dr. Antonio Wanderley Terni, por prestativamente aceitar o convite para ser meu orientador, pelo auxílio durante o processo de confecção deste trabalho e por todo o conhecimento transmitido ao longo desses últimos anos,

aos engenheiros Daniela Alessandra Rocco e William Faria Shiromoto, por aceitarem o convite para compor a banca deste trabalho,

aos colegas e amigos feitos durante o período de graduação, especialmente minha querida amiga Yara, pela colaboração, companheirismo e momentos proporcionados. A companhia de vocês tornou meus dias mais alegres e as dificuldades acadêmicas mais leves,

aos demais professores que acompanharam minha trajetória acadêmica na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, por compartilhar seu conhecimento e pela assistência na minha formação profissional, meu sincero: Muito Obrigada.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

O presente trabalho apresenta, por meio de um estudo de caso, uma análise de patologias encontradas em edifício de concreto armado localizado em cidade litorânea, assim como propostas de intervenção para os problemas ali encontrados. Ao identificar-se uma determinada patologia em obras de concreto armado, faz-se necessário conhecer suas causas, determinar em que etapa do processo construtivo ela foi gerada para que então sejam tomadas medidas cabíveis, sejam elas de reparos, de reforços ou ambos. Fazer um levantamento de problemas patológicos que uma estrutura apresenta, envolve minuciosa inspeção visual, muitas vezes utilizando ensaios de campo que sejam pertinentes às informações que se deseja obter. O mapeamento das condições da estrutura, aliadas às informações obtidas sobre o projeto, execução e manutenção da obra, formam subsídios para a escolha de uma solução adequada para cada um dos problemas encontrados, levando sempre em conta a relação custo-benefício da solução adotada, bem como os objetivos do proprietário quanto ao uso do edifício. Levando-se isso em conta, apresenta-se nesta obra, ainda, uma proposta de projeto de reforço de pilares, de modo que estes passem a suportar a solicitação extra de cargas oriundas de novos pavimentos incluídos ao edifício.

PALAVRAS-CHAVE: Patologia de construções. Estruturas de concreto armado. Projeto de reforço.

ABSTRACT

The present work presents, through a case study, an analysis of pathologies found in an armed concrete building located in a coastal city, as well as proposals for assistance to the problems encountered. When identifying a particular pathology in the works of reinforced concrete, it is necessary to know its causes, to determine in which stage of the constructive process was conceived so that the necessary measures are taken, be they repaired, reinforcements, or both. Make a survey of pathological problems that a structure presents, involve thorough visual inspection, often use field trials that are relevant to the information that one wishes to obtain. The mapping of the conditions of the structure, together with the information obtained on the project, execution and maintenance of the work, form the basis for a choice of an adequate solution for each of the problems encountered, always considering the cost-benefit relation of the solution adopted, as well as the owner's goals for the use of the building. Taking this into account, this project also presents a proposal for the reinforcement of pillars, so that they will be able to withstand an extra load request from new pavements included in the building.

KEYWORDS: Pathology of constructions. Structures of reinforced concrete. Reinforcement project.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Manifestações patológicas mais comuns em estruturas de CA.....	16
Figura 2 - Incidência de patologias segundo suas origens	16
Figura 3 - Causas intrínsecas aos processos de deterioração das estruturas de concreto.....	25
Figura 4 - Causas extrínsecas aos processos de deterioração das estruturas de concreto	26
Figura 5 - Desempenho ao longo do tempo	28
Figura 6 - Classificação de vida útil	29
Figura 7 - SO ₂ na atmosfera, velocidade de deposição de cloretos e velocidade de corrosão do aço	32
Figura 8 - Evolução da corrosão do aço-carbono exposto a três atmosferas diferentes	32
Figura 9 - Evolução de custos	33
Figura 10 - Corrosão uniforme e localizada	37
Figura 11 - Formas de pites segundo a ASTM.....	37
Figura 12 - Esquema do processo eletroquímico da corrosão.....	39
Figura 13 - Célula de corrosão em concreto armado	40
Figura 14 - Instalação do processo de corrosão de uma barra de armadura.....	41
Figura 15 - Corrosão de metal exposto a atmosfera em função da U.R.	43
Figura 16 - Influência da relação A/C na permeabilidade de pastas de cimento altamente hidratadas.....	44
Figura 17 - Grau de carbonatação em relação a U.R. do ar	45
Figura 18 - Equilíbrio de potencial pH para o sistema FeH ₂ a 25°C	46
Figura 19 - Variação da profundidade de carbonatação em função da relação A/C	47
Figura 20 - Evolução do tempo na degradação de uma estrutura de CA, devido a corrosão por carbonatação	47
Figura 21 - Carbonatação condicionada pela fissuração.....	48
Figura 22 - Retração do concreto em função do consumo de cimento e relação A/C	50
Figura 23 - Manifestação típica de corrosão em diferentes elementos estruturais	54
Figura 24 - Emenda com transpasse	56
Figura 25 - Emendas; (a) com solda; (b) com luvas	57
Figura 26 - Etapas de uma recuperação em viga danificada por corrosão;.....	57
Figura 27 - Formas de proteger a superfície do concreto; (a) formador de película; (b) bloqueador de poros; (c) hidrofugante de superfície	58
Figura 28 - Fissurômetro.....	59

Figura 29 - Testemunhas com traços de referência; (a) indicam deslocamentos na horizontal; (b) indicam deslocamentos na vertical.....	60
Figura 30 - Localização dos tubos de injeção na fissura.....	61
Figura 31 - Grampeamento desalinhado	62
Figura 32 - Diagrama tensão x deformação de cálculo do aço (σ_{sd} x ϵ_{sd}).....	64
Figura 33 - Diagrama tensão x deformação de cálculo do concreto.....	65
Figura 34 - (a) Esquema da seção transversal; (b) Diagrama de deformações ao longo da altura da seção; (c) Diagrama de tensão ao longo da altura da seção (diagrama parábola-retângulo); (d) Diagrama de tensão ao longo da altura da seção (diagrama retangular simplificado).....	65
Figura 35 - Detalhe típico do pilar de reforço (cm)	81
Figura 36 - Detalhamento de armaduras (cm)	82
Figura 37 - Vista frontal dos chumbadores do pilar existente (cm)	82
Figura 38 - Detalhamento construtivo dos chumbadores no pilar existente (cm)	83
Figura 39 - Perspectiva do chumbamento do topo do pilar com viga superior	83
Figura 40 - Detalhamento dos chumbadores da viga superior (cm)	84
Figura 41 - Cabeça de reforço	84
Figura 42 - Detalhamento da cabeça de reforço (cm).....	85
Figura 43 - Gaiola da cabeça de reforço	85
Figura 44 - Detalhamento da gaiola da cabeça de reforço (cm)	86
Figura 45 - Detalhamento da viga de equilíbrio entre o pilar e a sapata (cm)	87
Figura 46 - Vista em corte da viga de equilíbrio e a sapata (cm)	87
Figura 47 - Vista em planta da ligação entre viga de equilíbrio e sapata de reforço (cm).....	88
Figura 48 - Armadura da sapata (cm)	88
Figura 49 - Perspectiva dos elementos de reforço	89
 Fotografia 1 - Edifício em seu estado original	 69
Fotografia 2 - Tubos de PVC atravessando viga	70
Fotografia 3 - Tubos de PVC atravessando viga - vista frontal	71
Fotografia 4 - Corrosão de armadura do pilar	72
Fotografia 5 - Fissura gerada por expansão volumétrica	72
Fotografia 6 - Musgo no chão da estrutura	73
Fotografia 7 - Musgo na laje da varanda.....	73
Fotografia 8 - Escurecimento de superfície de concreto devido a carbonatação.....	74

Fotografia 9 - Escavação da base do pilar sem fundação.....	74
Fotografia 10 - Pilar sem apoio	75
Fotografia 11 - Limpeza do concreto.....	77
Fotografia 12 - Corte de concreto para exposição de armadura corroída	77
Fotografia 13 - Aplicação de proteção nas armaduras	79
Fotografia 14 - (a): Retirada de corpos de prova; (b) Corpo de prova retirado.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Despesas com construção em países desenvolvidos	18
Tabela 2 - Classificação de agressividade ambiental.....	31
Tabela 3 - Origem dos problemas patológicos em relação às suas etapas de produção	33
Tabela 4 - Exemplos de patologias geradas na etapa de execução	35
Tabela 5 - Tipos de corrosão	36
Tabela 6 - Porcentagem ideal de água em concreto em relação à U.R. do ar	43
Tabela 7 - Umidade relativa do ar segundo grau de saturação.....	43
Tabela 8 - Procedimentos para limpeza das superfícies do concreto instantes antes de aplicar o material de reforço/restauro.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA	Concreto armado
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
ELS-W	Estado Limite de Abertura de Fissuras
NBR	Norma Brasileira
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção.
SINDUSCON	Sindicato da Indústria da Construção Civil
SPT	Standart Penetration Test
TR	Tempo de retorno
U.R.	Umidade relativa
VUP	Vida útil de projeto

LISTA DE SÍMBOLOS

A/C	Relação água/cimento
AF	Alto Forno
$A_{s \text{ min}}$	Área Mínima de Aço das Armaduras de Tração
B	Base da edificação
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
E_c	Módulo de deformação longitudinal do concreto a compressão
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_{tk}	Resistência característica do concreto à tração
H	Altura da edificação
L	Comprimento da viga
pH	Potencial Hidrogeniônico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	15
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	OBJETIVO GERAL	19
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.5	MÉTODOS	20
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	22
2.2	CONCEITOS PERTINENTES EM PATOLOGIAS DE ESTRUTURAS	24
2.2.1	Patologias em estruturas de concreto armado	24
2.2.2	Desempenho, vida útil e durabilidade.....	27
2.2.2.1	Desempenho	27
2.2.2.2	Vida útil	28
2.2.2.3	Durabilidade.....	30
2.2.3	Agressividade do meio ambiente	30
2.2.4	Patologias por falhas de projeto	33
2.2.5	Patologias por falhas de execução	34
2.2.6	Corrosão de armaduras.....	35
2.2.6.1	Definição	35
2.2.6.2	O mecanismo da corrosão em meio aquoso.....	38
2.2.6.3	Fatores que influenciam a corrosão	42
2.2.7	Carbonatação.....	45
2.2.8	Fissuras	48
2.3	ENSAIOS INFORMATIVOS SOBRE OS MATERIAIS DA ESTRUTURA	52
2.4	TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO E/OU REFORÇO DE ESTRUTURAS.....	53
2.4.1	Recuperação de armaduras corroídas	54
2.4.2	Recuperação de fissuras	58
2.4.3	Reforço de elementos estruturais por aumento de seção.....	62
2.5	DIMENSIONAMENTO DE ARMADURAS	63
2.5.1	Armaduras longitudinais.....	63
2.5.2	Armaduras transversais	67

3	ESTUDO DE CASO - APRESENTAÇÃO	69
4	MAPEAMENTO DE PATOLOGIAS	70
4.1	PATOLOGIAS GERDAS NA ETAPA DE PROJETO	70
4.2	PATOLOGIAS GERADAS NA ETAPA DE EXECUÇÃO	71
5	PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO	75
5.1	REDISTRIBUIÇÃO DE TUBOS PVC	76
5.2	LIMPEZA DE SUBSTRATOS	76
5.3	TRATAMENTO DE AÇO	78
5.4	EXTRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA	79
6	PROJETO DE REFORÇO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS	81
7	CONCLUSÃO	90
	REFERÊNCIAS.....	92
	APÊNDICE A.....	94
	APÊNDICE B.....	95
	ANEXO A.....	96

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

O avanço tecnológico ao longo dos anos representou grandes melhorias de qualidade de vida. A construção civil, nesse aspecto, atualmente conta com diversas técnicas e novos materiais que proporcionam ao consumidor final um produto com melhor desempenho e durabilidade.

Se a preocupação com a eficiência e qualidade dos serviços de construção civil cresceu com o passar do tempo, pôde-se notar também que as patologias de edificações não decresceram proporcionalmente e, muitas vezes, se encontram em condições insatisfatórias após pouco tempo de uso requerendo intervenções que nem sempre são de simples execução.

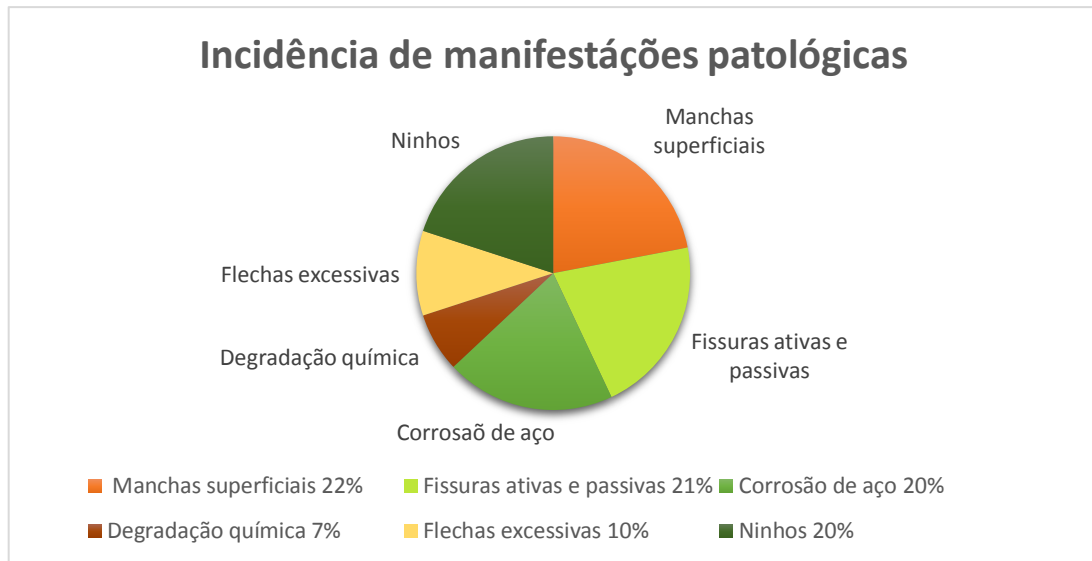
De fato, quanto mais antiga é a origem do problema mais complexa e onerosa é a recuperação que deve-se executar.

Segundo Marques de Jesus (2008) no Brasil, por diversos fatores, especialmente socioeconômicos, é relativamente grande a quantidade de edificações onde uma interdição para reformas é necessária, de modo que a gestão pública dos estados têm visto a necessidade de criar projetos que promovam recuperação de edificações para que se adequem aos padrões de segurança e necessidade de usuários diminuindo, assim, a vacância parcial ou completa de edifícios em seus municípios.

A necessidade de intervenções técnicas na estrutura muitas vezes está atrelada a um projeto mal elaborado ou mal executado que, aliado à cultura de não manutenção adequada, torna a incidência de patologias muito mais frequente do que o normal devido ao desgaste natural da estrutura.

A figura 1 abaixo relaciona as principais manifestações patológicas encontradas em estruturas de concreto armado:

Figura 1 - Manifestações patológicas mais comuns em estruturas de CA

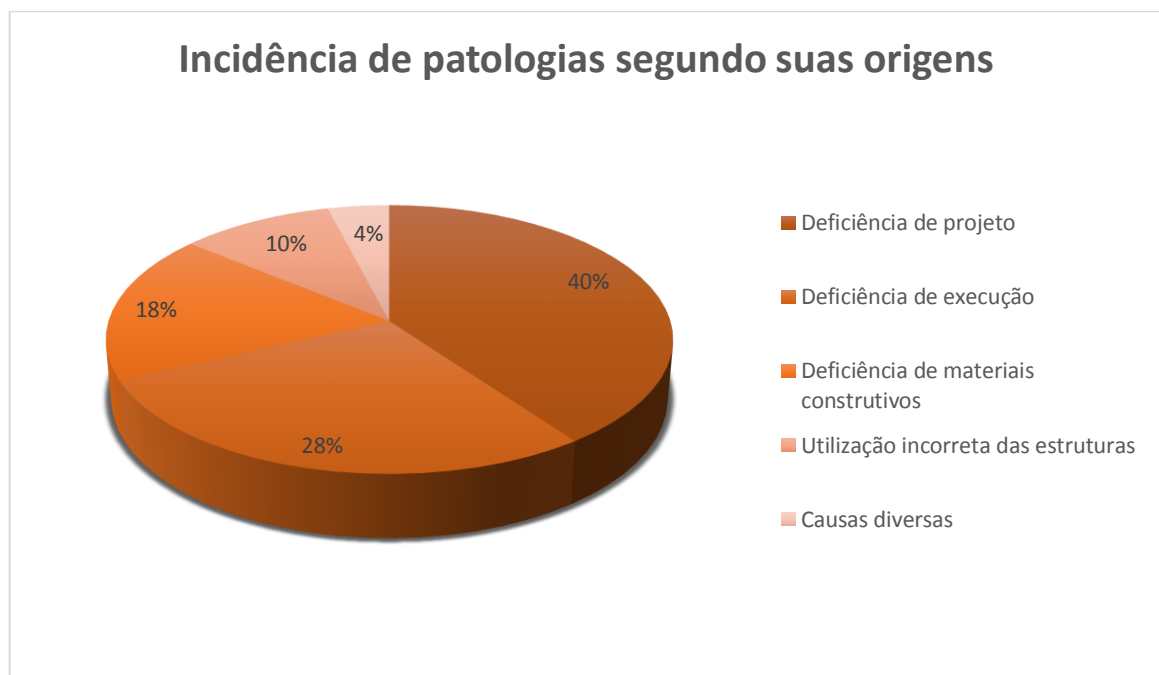


Fonte: Helene (1992)

Além disso, pode-se relacionar, percentualmente, a incidência das manifestações patológicas segundo a sua origem, que podem ser por erros de projeto, execução, escolha de materiais construtivos, utilização incorreta e até mesmo causas diversas.

Os resultados podem ser conferidos no gráfico abaixo:

Figura 2 - Incidência de patologias segundo suas origens



Fonte: Machado (2002)

O estudo das patologias em construção civil se destina a compreender as causas da deterioração insatisfatória tanto das estruturas quanto de seus materiais e procura encontrar os fatores responsáveis pela manifestação patológica, sua gravidade, sua influência no desempenho da estrutura, bem como apontar melhores opções de reparos sempre levando em consideração a disponibilidade técnica e a relação custo-benefício de execução.

A identificação dos problemas ou do estado em que uma estrutura se encontra é feita comumente por vistorias executadas por profissional habilitado.

Em tais vistorias é possível determinar se a estrutura está sob uma condição de deterioração natural ou se algum fator está sob condição de uma degradação mais acelerada que o previsto.

De acordo com Ferreira (2005) a análise realizada permite, inclusive, traçar um planejamento de manutenção e recuperação de acordo com a disponibilidade financeira do proprietário, que sempre percebe-se que é limitada.

Uma vez identificados os fatores que merecem atenção na estrutura investigada faz-se necessário traçar uma estratégia de recuperação e prevenção para os elementos que as requeiram.

A princípio, o desenvolvimento de soluções para uma determinada patologia nunca é único, ou seja, não existe um único modo de solucionar um problema decorrente de uma determinada patologia.

Isso porque atualmente o mercado oferece vários materiais e produtos que corrigem uma mesma falha, além de existirem diversas técnicas que podem ser eficazes para um mesmo estado patológico, em função da necessidade do usuário.

Uma solução ótima é sempre aquela que atende aos padrões de segurança, reabilite ou reforme a estrutura para atuar sem ultrapassar seus limites últimos e apresente o menor custo possível.

De acordo com Dal Molin (1988), o estudo de patologias em construções através de suas manifestações características auxilia no conhecimento mais profundo de suas causas além de subsidiar com informações pertinentes para o desenvolvimento dos trabalhos de manutenção e recuperação para que, desta maneira, permita auxiliar no processo de minimização de incidência das mesmas.

A importância do tema dá-se, portanto, do fato de ser necessária a compreensão das origens de manifestações patológicas para que seja possível determinar o reparo adequado ao problema, para aplicação do uso correto de materiais e métodos e obter-se custo adequado, de

forma que a estrutura não só volte a apresentar desempenho satisfatório dentro dos limites esperados como também para estabelecer novamente sua segurança para utilização.

1.2 JUSTIFICATIVA

Gastos com reformas representam grande porcentagem dos custos com a construção civil no Brasil.

Na região metropolitana de São Paulo, no ano de 2015, por exemplo, uma pesquisa feita pela Plataforma de Inteligência de Mercado Grupo Revenda (2016) constatou que dos R\$ 83.004.914.676,76 gastos com construção, R\$ 52.293.096.246,36 eram devidos às obras de reforma (estrutura, elétrica e hidráulica).

Esses valores correspondem a cerca de 63% dos gastos e se comparados àqueles de construções de países desenvolvidos como mostra a tabela 1 abaixo, pode-se notar que mesmo que os custos referentes a intervenções técnicas nesses países não cheguem aos 63% da região metropolitana de São Paulo, ainda assim são expressivos.

Tabela 1 - Despesas com construção em países desenvolvidos

País	Gastos com construções novas	Gastos com manutenção e reparo	Gastos totais com construção
França (2004)	85,6 bi Euros (52%)	79,6 bi Euros (48%)	165,2 bi Euros
Alemanha (2004)	99,7 bi Euros (50%)	99,0 bi Euros (50%)	198,7 bi Euros
Itália (2002)	58,6 bi Euros (43%)	76,8 bi Euros (57%)	135,4 bi Euros
Reino Unido (2004)	60,7 bi Pounds (50%)	61,2 bi Pounds (50%)	121,9 bi Pounds

Fonte: Ueda e Takewaka (2007)

Dessa forma, é possível afirmar que compreender técnicas de recuperação e reparo de estruturas é tão importante quanto ter o conhecimento de como projetá-las.

Justifica-se a escolha do tema pelo fato de no Brasil ainda ser grande a incidência de profissionais que se formam sem ter subsídio suficiente para executar serviços de vistoria e projetos de reforço ou recuperação de estruturas de maneira a tornar a manutenção e reparos das mesmas sejam muitas vezes excessivos e não raramente mais onerosos do que o necessário.

A esse respeito, Thomaz (1989) afirma:

Tais fatos, aliados à quadros mais complexos de formação deficiente de engenheiros e arquitetos, de políticas habitacionais e sistemas de financiamento inconsistentes e da inusitada fuga de recursos para atividades meramente especulativas, vêm provocando a queda gradativa da qualidade das nossas construções, até o ponto de encontrarem-se edifícios que, nem tendo sido ocupados, já estão virtualmente condenados. Para a solução de tais problemas, a experiência revela que as obras de restauração ou reforço são em geral muito dispendiosas; e o que é mais grave... nem sempre solucionam o problema de forma definitiva. Os encargos decorrentes dessas reformas desnecessárias representem também um grande ônus para a economia dos países pobres, onde, via-de-regra, há enorme carência de habitações, de materiais de construção, de mão-de-obra especializada e de recursos de uma forma geral. (THOMAZ, 1989, p. 15).

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é utilizar um estudo de caso de uma estrutura que apresenta várias manifestações patológicas e utilizá-la como exemplo para melhor compreensão do conceito sobre patologias de estruturas, fundamentalmente de concreto armado, utilizando, dentre outros procedimentos, o da documentação fotográfica, a análise e o diagnóstico para entender suas causas, sua sintomatologia e recomendar possíveis e necessárias intervenções técnicas a serem adotadas.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Podem-se citar os seguintes objetivos específicos neste trabalho:

- a) Demonstrar, por meio de fundamentação teórica, a importância sobre o estudo de patologia nas construções e quais são suas causas geradoras em estruturas de concreto armado e assim desenvolver considerações de como e quando podem surgir numa edificação;
- b) Executar um mapeamento fotográfico da estrutura utilizada neste estudo de caso de modo a avaliar seu estado patológico e identificar quais são seus problemas e possíveis intervenções;
- c) Retirar amostras de corpos de prova para realização de ensaios para aferir a resistência à compressão do concreto;
- d) Propor dentre as diversas opções existentes, as intervenções técnicas para solucionar os problemas de patologias e incorreções estruturais encontradas, sem

deixar de levar em consideração os limitantes deste processo como custo, disponibilidade de materiais e nível de especialização da mão-de-obra e

- e) Apresentar propostas de projeto de reforço estrutural de pilares e criação de uma sapata de solidarização com um pilar de reforço posto que um dos pilares foi encontrado sem a respectiva fundação.

1.5 MÉTODOS

Este trabalho é realizado com base num estudo de caso de uma edificação localizada no litoral norte de São Paulo e busca identificar suas patologias e possíveis intervenções.

Inicialmente é elaborado um levantamento bibliográfico a respeito do tema que serviu para fundamentação teórica na identificação das patologias bem como seus métodos de recuperação.

Além disso, é realizado um mapeamento fotográfico dos problemas encontrados através de inspeção visual para desenvolver as devidas comparações com as referências bibliográficas pesquisadas a respeito do tema e para em seguida apresentar um diagnóstico sobre a estrutura avaliada.

Assim, utilizam-se das possibilidades dos diagnósticos propostos para estudar as possibilidades de recuperação das patologias identificadas, fundamentadas na bibliografia pesquisada, no bom senso e em considerações sobre a relação custo-benefício para apresentação de sugestões de intervenções técnicas.

Por meio das considerações elaboradas a partir dos resultados dos ensaios realizados e com o objetivo estabelecido pelo proprietário do empreendimento de aumentar o número de pavimentos da estrutura, procura-se desenvolver, ainda, um projeto simples, qual seja, o de reforço de pilares, sendo que em um deles foi necessária a inclusão de uma sapata para receber as solicitações, visto que nele detectou-se a falta de fundação.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em oito capítulos que a seguir resumem-se:

O *capítulo 1* procura descrever a importância do tema escolhido para o trabalho e apresenta justificativas, objetivos e métodos.

O *capítulo 2* apresenta toda a fundamentação teórica utilizada para elaboração deste trabalho, define conceitos pertinentes ao estudo de patologias em estruturas de concreto armado e explica as patologias encontradas no estudo de caso, detalha suas origens, mecanismos e formas de manifestação.

O *capítulo 3* destina-se a uma breve apresentação do edifício em foco do estudo de caso deste trabalho.

O *capítulo 4* mostra o levantamento fotográfico dos problemas encontrados no edifício do estudo deste caso.

Já o *capítulo 5* destina-se a recomendação de propostas de intervenção para as patologias apontadas no capítulo 4.

O foco do *capítulo 6* é a apresentação de um projeto de reforço estrutural de pilares do edifício do estudo de caso, pois leva em consideração o objetivo do proprietário de construir mais pavimentos. Além disso, propõe-se a inserção de uma sapata sob um dos pilares, pelo fato de a inspeção constatar a falta de fundação em um desses pilares.

No *capítulo 7*, procura-se relatar as conclusões observadas no estudo do tema deste trabalho e traz um parecer sobre a relevância do tema, sobre a obra estudada e sobre o alcance dos objetivos aqui propostos.

Por fim, o *capítulo 8* relaciona a bibliografia consultada para confecção desta obra.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Ao estudar a história da construção civil e, particularmente, do uso do concreto em edificações, nota-se que a técnica de endurecimento da cal hidratada já era conhecida pelos romanos desde o século IV a.C., sendo eles os primeiros a utilizar concreto em larga escala.

Mais tarde, de acordo com Pedroso (2009), no ano de 1824 na Inglaterra seria patenteado por Joseph Aspdin o cimento de nome mais conhecido e utilizado hoje no Brasil, o cimento Portland.

Obviamente, ao longo das décadas este desenvolvimento tecnológico permitiu grandes avanços nos métodos empregados para a queima da rocha calcária e da argila de modo que o método de Aspdin fosse aprimorado em desempenho, motivo pelo qual o concreto que utiliza o cimento Portland é tão difundido e empregado até os dias de hoje, com diversas variações adaptadas à necessidade do empreendimento.

Apesar da evolução da tecnologia do cimento daquela época, somente em meados de 1850 ficou conhecido o primeiro uso do cimento armado, terminologia utilizada para o concreto armado até então, pela inovadora obra de Joseph Louis Lambot que, motivado por estudos a respeito da durabilidade e resistência do concreto, construiu um barco com barras de ferro no interior de uma massa de cimento.

O experimento foi patenteado em 1855 e apesar de não causar muita repercussão por si só, serviu de inspiração para pesquisas de Joseph Monier, que segundo Kaefer (1998), viria a disseminar posteriormente a utilização de armaduras em concreto.

Se por um lado o uso do concreto em sua concepção mais moderna tenha surgido no século XIX, a preocupação com patologias em estruturas é tão antiga quanto a própria necessidade do ser humano de construir habitações para si.

Prova disso, de acordo com Buzon (1976), é a menção no Código de Hamurabi, criado na Mesopotâmia há 4000 anos, às punições advindas de construções mal executadas e que causassem algum tipo de prejuízo ao proprietário.

Segundo Souza e Ripper (1998, p. 13), o crescimento acelerado das técnicas de construção civil em alguns países e em certas épocas impôs implicitamente a aceitação de maiores e novos riscos que se limitados ao conhecimento tecnológico podem, apesar de calculados e controlados, causar nas estruturas sua deterioração precoce ou acidentes.

Dessa forma, por erros provenientes de diversos fatores existem hoje muitos empreendimentos apresentando manifestações patológicas, de modo que o engenheiro civil precisa estar devidamente preparado para reconhecê-las, identificar suas causas, bem como adotar as medidas aplicáveis a cada caso, sejam elas de recuperação ou reforço da edificação.

Para tanto, Cánovas (1988, p. 9) afirma que o estudo do histórico da obra é fundamental, sendo necessário conhecer os projetos iniciais, os tipos de materiais que são empregados, conhecer os dados sobre a análise do terreno, as ações acidentais a que a estrutura é submetida etc., de modo que se disponha de todas as informações necessárias sobre a confecção da estrutura e esse é o material que subsidia a identificação dos maiores problemas da obra e a melhor estratégia para correção dos mesmos.

Não raramente, entretanto, os documentos prévios não são suficientes para expor todos os dados indispensáveis ao diagnóstico de obra e, por vezes, torna necessário dispor de outras ferramentas que permitam uma avaliação mais completa da estrutura.

Assim, infere-se a importância de uma boa inspeção da estrutura danificada e da possibilidade de contar com a retirada de testemunhos para realização de ensaios, que geram dados que complementam a inspeção e que permitem quantificar e qualificar a gravidade da patologia.

O completo estudo do estado da edificação permite que o engenheiro responsável tenha condições de relacionar as anomalias em escala de prioridade e levar em consideração as condições financeiras do proprietário, que muitas vezes são limitadas, especificando quais falhas merecem atenção imediata e quais prejudicam em menor proporção o desempenho da estrutura.

Dessa avaliação pode-se criar então projetos que podem ter efeitos de reparo ou reforço.

Entende-se, segundo Cánovas (1988), por *reparo* todas as medidas de intervenção que visam devolver à estrutura suas características originais, enquanto o *reforço* é destinado a aumentar a capacidade resistente do projeto original de um elemento ou estrutura.

Em qualquer dos dois casos, Machado (2002) afirma que devem estar bem definidas as condições básicas de desempenho futuro da estrutura, tais como a:

- ✓ Destinação e condições de utilização da construção, que tem a função de chamar atenção para que não ocorra solicitações indevidas da mesma e a

- ✓ Definição da segurança estrutural, determinando os carregamentos-limite. O autor reitera, ainda, que essas recomendações impedem que os valores das tensões e deformações admitidas sejam excedidos para a construção recuperada.

A execução do projeto de reparo ou reforço permite, em última instância, que a estrutura volte a se comportar como previsto em projeto ou adquira capacidade resistente superior para atender a sua nova finalidade.

2.2 CONCEITOS PERTINENTES EM PATOLOGIAS DE ESTRUTURAS

2.2.1 Patologias em estruturas de concreto armado

O termo patologia vem do grego (pathos referente à doença e logia referente à ciência, estudo) e é empregado na construção civil para referir-se a qualquer anomalia, enfermidade que a obra apresente.

Manifestações patológicas podem surgir por diversos motivos e de diferentes formas, dependendo do histórico de projeto, execução e utilização ou manutenção da construção.

Segundo Helene (1992), a patologia, de maneira geral, pode ser entendida na Engenharia como sendo a ciência que estuda os sintomas, os mecanismos, as causas e as origens e defeitos das construções civis, de forma a fazer um mapeamento do problema apresentado.

Machado (2002) reforça que o objetivo principal da patologia de estruturas é:

[...] encontrar explicações técnicas e científicas para as anomalias encontradas no comportamento das estruturas, seja durante a sua construção, seja em fase de serviço, para que se determinem as suas origens e suas consequências em relação a sua segurança e à confiabilidade da obra, permitindo que se tome uma decisão correta e segura quanto à utilização posterior das estruturas em análise. (MACHADO, 2002, p. 5).

O autor destaca, ainda, que de posse dos estudos dos sintomas apresentados permite-se apontar um diagnóstico de ocorrências, diagnóstico esse que só é completo se forem analisados e determinados com precisão.

Entre outros, destacam-se:

- ✓ As manifestações patológicas;
- ✓ Os vícios construtivos;

- ✓ As origens dos problemas;
- ✓ Os agentes causadores dos problemas e
- ✓ O prognóstico para a terapia.

Para Souza e Ripper (1998), a *Patologia de Estruturas* trata, além da concepção e do projeto das estruturas, da própria formação do engenheiro civil, destacando a importância de que o profissional esteja devidamente apto a tratar não apenas de etapas que precedem o empreendimento concluído, mas também das etapas de desempenho esperado durante a vida útil da obra.

Além disso, é possível dividir as causas das patologias, segundo os autores, em duas categorias, a saber: *causas intrínsecas* e *extrínsecas*.

O primeiro termo trata das falhas oriundas de materiais, peças estruturais (durante a fase de execução e/ou utilização), de falhas humanas, de questões próprias do concreto e ações externas.

O último refere-se aos problemas que independem do corpo estrutural. Os exemplos podem ser vistos nas figuras 3 e 4.

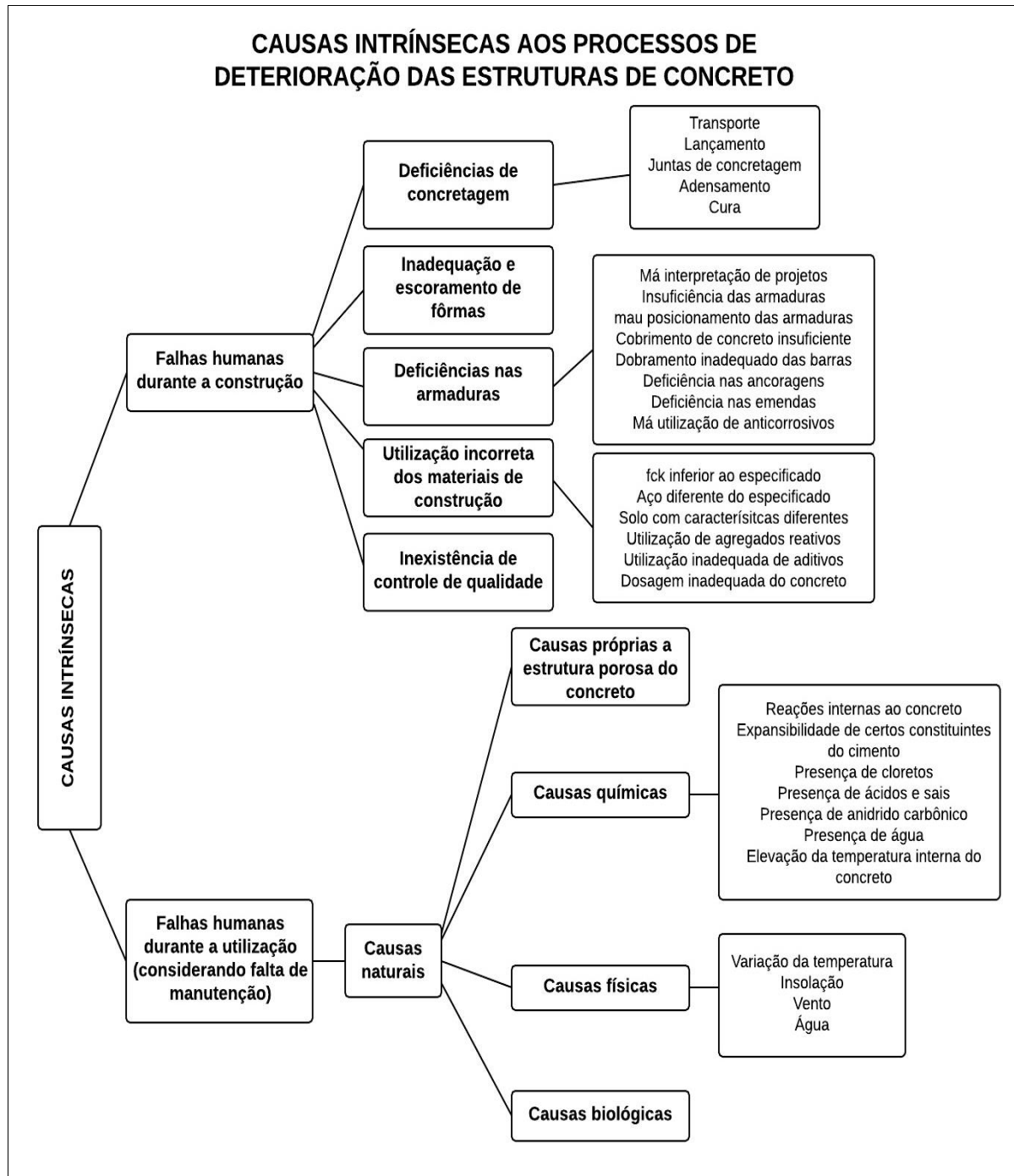
O estudo de patologias em construção civil não é algo novo no campo acadêmico uma vez que falhas, defeitos e doenças que sofrem as obras de concreto armado são tão antigos quanto o próprio material com o qual foram construídos.

O que se tem percebido, entretanto, é que o desenvolvimento de tecnologias tem exigido maiores rigores com a qualidade da obra final de forma que seja muito mais expressivo, não sendo mais razoável aceitar que uma estrutura apresente sinais de enfermidade logo nos primeiros anos de conclusão da obra.

Isso porque segundo Cánovas (1988), tempos atrás era comum super-dimensionar uma obra de modo que se ela demonstrasse algum tipo de falha na sua superfície, sabia-se que pelo excesso dimensional a estrutura dificilmente estaria comprometida quanto a sua integridade. Atualmente o cenário é diferente, pois o avanço do cálculo estrutural permite que a obra atinja o comportamento esperado com o muito menos gasto de material.

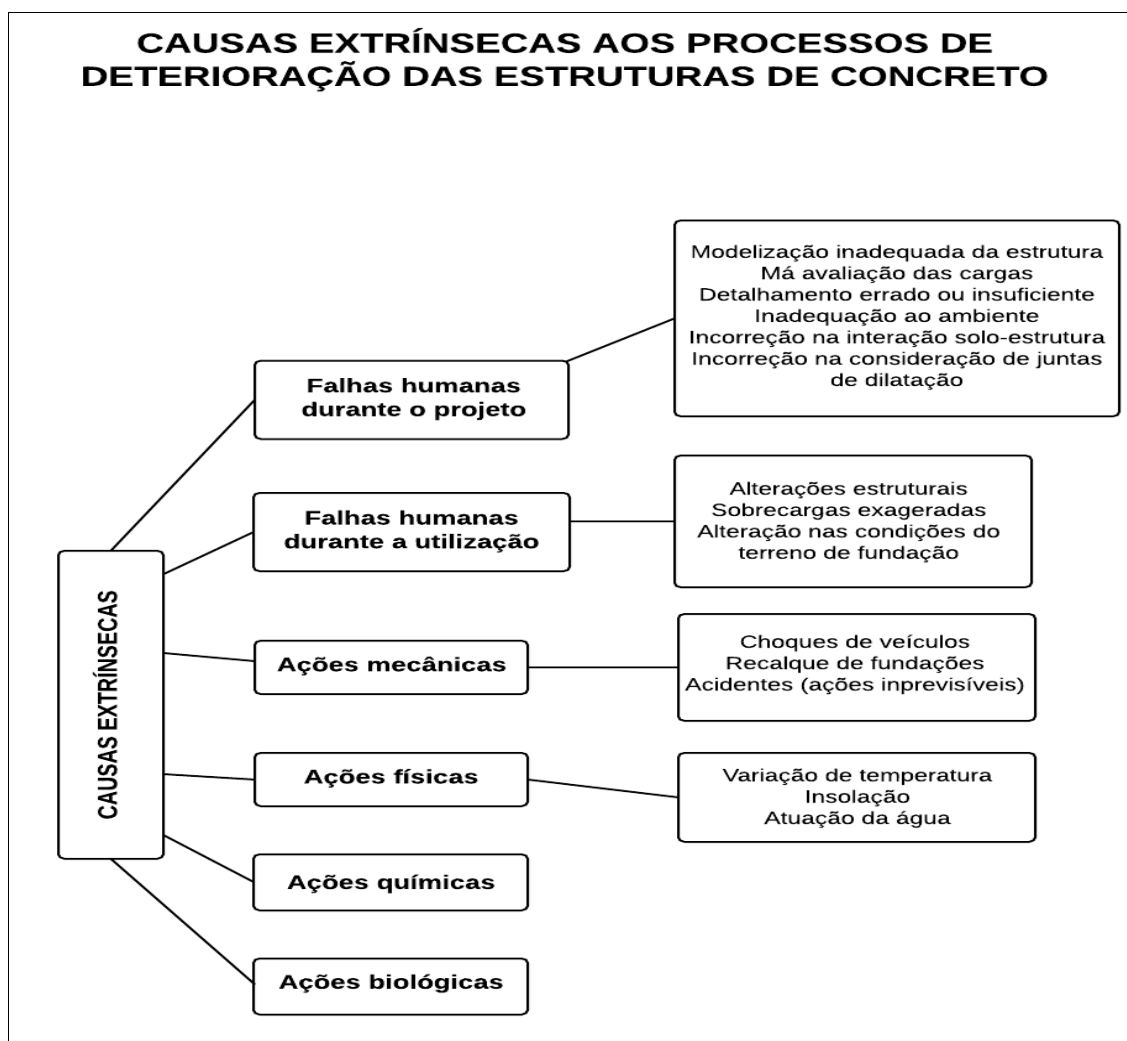
Dessa forma, visto que o fator de segurança já não é tão grande como outrora, se a estrutura desenvolve patologias logo no início de sua utilização, torna-se necessária a avaliação profunda do efeito provocado no desempenho da construção para que sejam tomadas as medidas cabíveis aos resultados obtidos.

Figura 3 - Causas intrínsecas aos processos de deterioração das estruturas de concreto



Fonte: Souza e Ripper (1998)

Figura 4 - Causas extrínsecas aos processos de deterioração das estruturas de concreto



Fonte: Souza e Ripper (1998)

2.2.2 Desempenho, vida útil e durabilidade

2.2.2.1 Desempenho

O conceito de *desempenho* é definido na NBR 6118/2014 como sendo a capacidade da estrutura poder ser plenamente utilizada sem apresentar danos que comprometam parcial ou totalmente o uso para o qual é projetada. No que diz respeito às edificações habitacionais, foco deste trabalho, a NBR 15575-1/2013 complementa o conceito afirmando que normas de desempenho visam atender os requisitos do usuário de modo que a estrutura atenda ao comportamento previsto em projeto sem focar nos materiais constituintes da mesma.

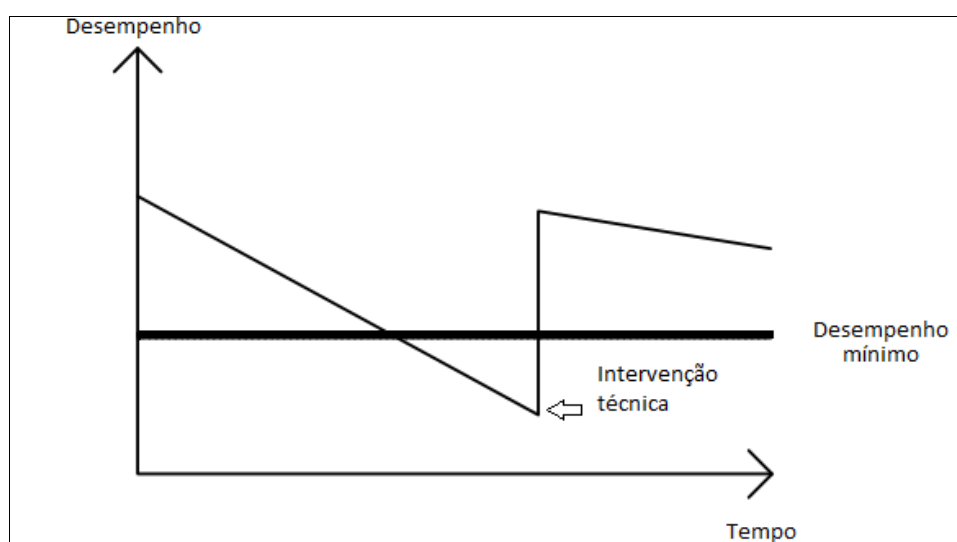
Ferreira (2005), destaca que uma vez detectada uma patologia e tendo em vista o comportamento esperado para a estrutura, é importante que se determine sua gravidade, sua

velocidade de evolução para uma previsão de quando tal patologia torna a estrutura abaixo dos limites mínimos especificados para sua utilização segura.

Souza e Ripper (1998) complementam que deve-se levar em consideração que o ponto em que a estrutura atinge desempenho insatisfatório varia não só quanto ao tipo da obra, mas também quanto à etapa que originou o problema.

Assim, dependendo do estágio em que a construção demonstra deficiências de desempenho, é preciso realizar intervenções técnicas que restabeleçam seu comportamento previsto.

Figura 5 - Desempenho ao longo do tempo



Fonte: Souza e Ripper (1998); Adaptado

2.2.2.2 Vida útil

A NBR 6118/2014 considera *vida útil* o período no qual as características das estruturas de concreto se mantêm obedecendo especificações de projeto, enquanto a NBR 15575-1/2013 delimita o termo como o tempo desde o início de operação ou uso até o momento em que seu desempenho se torna insatisfatório.

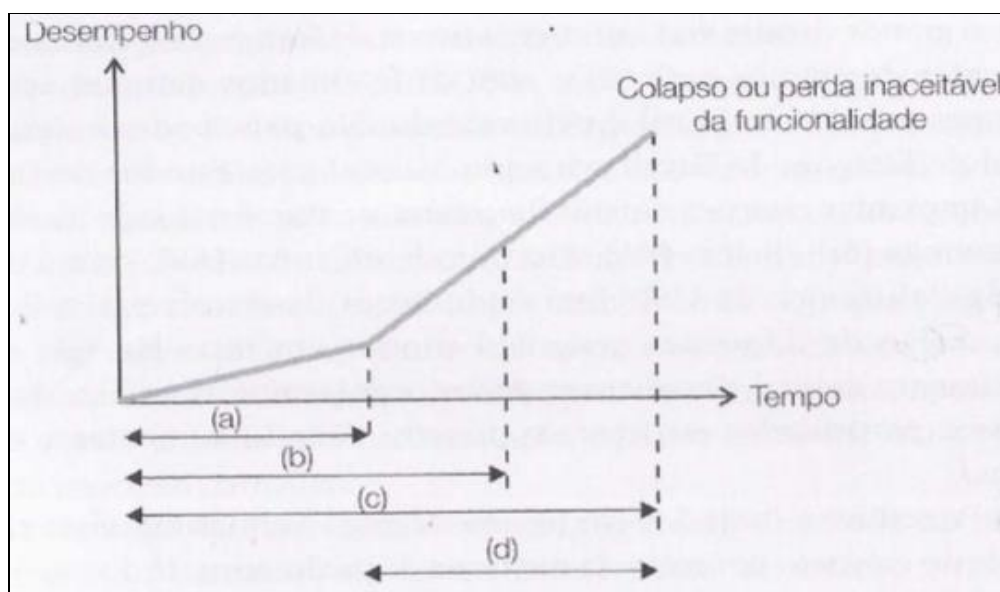
Bertolini (2010) define vida útil de uma estrutura como sendo o período no qual é capaz de garantir não apenas sua estabilidade, mas também garantir todas as funções para as quais é projetada.

Tal intervalo de tempo pode ser determinado pelo projetista, mas adota-se tradicionalmente 50 anos de vida útil em edifícios em geral.

Helene (1992) abrange ainda, a ideia do termo estratificando o conceito em relação ao todo da obra e em etapas em que pode demonstrar algum tipo de patologia de modo que o termo possa ser classificado em:

- a) *Vida útil de projeto*, que é o intervalo até a despassivação da armadura;
- b) *Vida útil de serviço*, referente ao período que começam a manifestar os efeitos dos agentes agressivos, desde o aparecimento de manchas na superfície do concreto até o deslocamento do concreto;
- c) *Vida útil total*, referente ao período em que a estrutura está tão comprometida que entra em colapso parcial ou total;
- d) *Vida útil residual* referente ao que seria o ponto a partir do qual a estrutura pode ser utilizada desde que tenha sido aprovada por vistoria ou intervenção.

Figura 6 - Classificação de vida útil



Fonte: Helene (1992)

De maneira geral, pode-se dizer então que a vida útil de uma estrutura é o intervalo de tempo no qual a obra atende as especificações de projeto até o momento em que seu desempenho se torna inadequado.

2.2.2.3 Durabilidade

De acordo com a NBR 6118/2014, *durabilidade* “consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.”

Arivabene (2015, p. 3) aponta também que “[...] o concreto é considerado durável quando desempenha as funções que lhe foram atribuídas, mantendo a resistência e a utilidade esperada, durante um período previsto.”

Já Souza e Ripper (1998, p. 20) afirmam que durabilidade é o parâmetro que relaciona a aplicação de características de deterioração do concreto e seus sistemas estruturais a uma determinada construção, individualizando-a pela avaliação da resposta que dá aos efeitos da agressividade ambiental e definindo, então, a vida útil da mesma.

Os autores ainda inferem que o conceito de durabilidade do concreto está intrinsecamente ligado à sua qualidade, que por sua vez tem grande relação com o fator água em sua composição, uma vez que a água rege características como porosidade, permeabilidade, compacidade, densidade, entre outros.

Deve-se, ainda, levar em consideração a agressividade do meio para efeitos de prevenção quanto ao ataque de sulfatos e cloretos que possam vir a diminuir a qualidade do concreto final.

2.2.3 Agressividade do meio ambiente

Agressividade do meio ambiente é o termo que está associado, segundo a ABNT NBR 6118/2014 a todas ações físicas e químicas que atuam na estrutura de concreto, desconsiderando ações mecânicas, variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica entre outras que sejam consideradas pertinentes.

Recomenda-se por essa norma adotar classificação de acordo com o que se apresenta a seguir, avaliando a exposição da estrutura de estudo.

Tabela 2 - Classificação de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submerso	
II	Moderada	Urbano	Pequeno
III	Forte	Marinho*	Grande
		Industrial	
IV	Muito forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	
*: Pode-se admitir um micro-clima com classe de agressividade mais branda para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas etc.)			

Fonte: NBR 6118/2014, adaptado (2014)

Segundo essa tabela, o *ambiente marinho* é classificado como agressividade de classe III, caracterizando grande risco de deterioração precoce da estrutura.

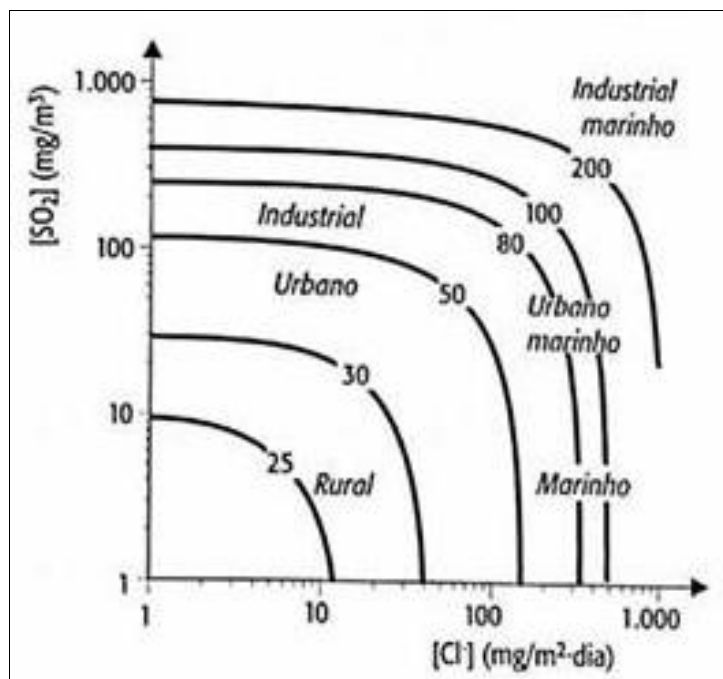
Dessa forma, de acordo com Vaysburb (2000), considerando que a estrutura corre risco de se deteriorar num curto período, o ideal é sempre prever em projeto um concreto de qualidade e também mecanismos que protejam a estrutura de ataque de cloretos, uma vez que Dhir, Jones e Ahmed (1991) apontam que ambientes com alta concentração destas substâncias tornam difícil a garantia da qualidade do concreto se consideradas apenas características como resistência, porcentagem de cimento e relação água/cimento.

A atmosfera marinha é caracterizada pela alta concentração de cloretos de sódio e magnésio podendo apresentar também sulfatos que, segundo Biczók (1978) pode possuir as seguintes concentrações, aproximadamente, em mg/l:

- ✓ Íons sulfato (SO_4^{2-}): 2800;
- ✓ Íons cloreto (Cl^-): 20000 e
- ✓ Íons magnésio (Mg^{2+}): 1400.

A figura 7 mostra a relação entre a concentração de SO_2 na atmosfera, a velocidade de deposição de cloretos sobre a superfície e a velocidade de corrosão do aço ($\mu\text{m/ano}$) em diferentes ambientes:

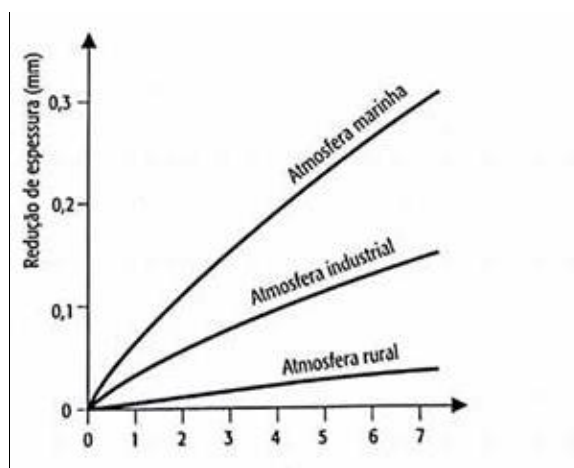
Figura 7 - SO_2 na atmosfera, velocidade de deposição de cloretos e velocidade de corrosão do aço



Fonte: Bertolini (2010)

Helene (1986) afirma que tais elementos são agressivos e contribuem para acelerar em cerca de 30 a 40 vezes o processo de corrosão das armaduras inseridas nesse ambiente se comparadas ao ambiente rural, fazendo uma construção com problemas de corrosão, que demoraria aproximadamente 8 anos para manifestar-se numa estrutura em meio rural, demonstrar seus sintomas característicos em apenas 2 ou 3 meses em meio marinho. A figura 8 indica a redução de espessura do aço em relação a exposição a diferentes ambientes:

Figura 8 - Evolução da corrosão do aço-carbono exposto a três atmosferas diferentes



Fonte: Bertolini (2010)

2.2.4 Patologias por falhas de projeto

É possível classificar, por meio de avaliação das patologias, que etapa foi responsável por seu surgimento. Erros cometidos nas fases de concepção e projeto da obra são preocupantemente comuns, como pode ser visto na tabela 3, abaixo.

Tabela 3 - Origem dos problemas patológicos em relação às suas etapas de produção

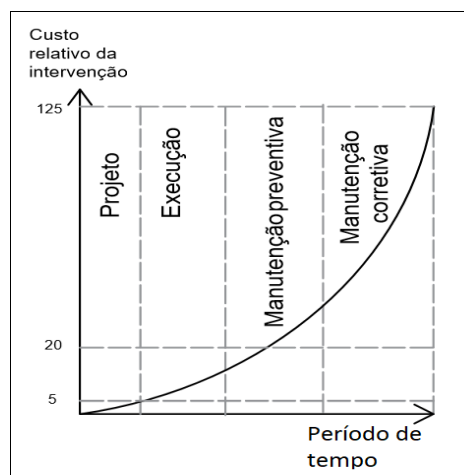
ETAPA	PORCENTAGEM
Projeto	40%
Execução	28%
Materiais	18%
Uso	10%
Planejamento	4%

Fonte: Helene (1992)

Vale destacar segundo Ferreira (2005), ainda, que quanto mais cedo a falha for concebida, maiores as chances da possibilidade de reparo mais complexo e, conseqüentemente, mais oneroso.

Sobre isso, pode-se inferir uma relação entre a origem da patologia com o custo de reparo necessário, como pode ser observado no gráfico abaixo, apontado por Helene (1992), que afirma ser esta a “Lei de Sitter”, onde os custos são menos expressivos e mais simples quanto mais cedo forem detectadas e reparadas as patologias:

Figura 9 - Evolução de custos



Fonte: Helene (1992)

Nesse aspecto, fica clara a importância de um projeto bem estruturado e claro, visto que o investimento de mais tempo nesta etapa preliminar pode significar grandes economias futuras.

Souza e Ripper (1998) elencam uma série de patologias que podem ser ocasionadas por falhas de projeto, a saber:

- ✓ Elementos de projeto inadequados (má definição das ações atuantes ou da combinação mais desfavorável das mesmas, escolha infeliz do modelo analítico, deficiência no cálculo da estrutura ou na avaliação da resistência do solo, etc.);
- ✓ Falta de compatibilização entre a estrutura e a arquitetura, bem como com os demais projetos civis;
- ✓ Especificação inadequada de materiais;
- ✓ Detalhamento insuficiente ou errado;
- ✓ Detalhes construtivos inexequíveis;
- ✓ Falta de padronização das representações (convenções) e
- ✓ Erros de dimensionamento.

Outro aspecto a ser considerado é o que expõe Marcelli (2007) a respeito do crescimento acelerado do uso de softwares de cálculo estrutural.

Segundo ele, patologias de projeto podem ser geradas pela simples incorreta inserção de dados que podem não corresponder com o objetivo proposto, fazendo com que o programa gere dados errôneos e, conseqüentemente, predispondo a obra a manifestar patologias.

O autor sugere, ainda, que tais equívocos podem surgir devido à falta de um “sentimento estrutural” por parte do engenheiro, que seria uma noção intuitiva do comportamento estrutural da obra, fazendo-o cometer alguns deslizes no dimensionamento dos elementos estruturais em seu projeto.

2.2.5 Patologias por falhas de execução

Como comentado anteriormente, as patologias de projeto são responsáveis por cerca de 40% dos problemas encontrados em obras.

Falhas de execução, no entanto, de acordo com o mesmo gráfico de Helene (1992), correspondem a 28% das falhas encontradas. Erros desse tipo segundo Souza e Ripper (1998)

podem decorrer de uma série de fatores, inclusive como consequência direta de falhas de projeto. Segundo eles, as causas são diversas, como falta de condições locais de trabalho, falta de mão-de-obra especializada, inexistência de controle de qualidade e execução, má qualidade dos materiais e componentes, irresponsabilidade técnica e até sabotagem. Sinalizam, ainda, que podem tanto existir erros grosseiros, fáceis de serem identificados, quanto erros de difícil verificação, que só podem ser observados depois de um determinado tempo de uso da estrutura. Exemplos dados pelos autores são descritos na tabela abaixo:

Tabela 4 - Exemplos de patologias geradas na etapa de execução

Falhas de fácil verificação	Falhas de difícil verificação
Falta de prumo, esquadro ou alinhamento	Instalações elétricas
Desnívelamento de pisos	Instalações hidráulicas
Flechas excessivas em lajes	

Fonte: Souza e Ripper (1998)

Souza e Ripper (1998) ainda observam que uma característica que difere a construção civil de outros métodos de produção é o fato de que nesse ramo o produto final é estático, ou seja, seu destino final é o próprio local onde foi produzido. Isso muitas vezes significa comprometimento na qualidade da obra final, uma vez que tal qualidade depende da mão-de-obra que se disporá para trabalhar no local, de estar exposta ao ar livre, sujeita às intempéries locais, depende de um canteiro de obras previamente projetado para as necessidades daquele projeto, depende da qualidade do concreto que será utilizado se for virado no próprio canteiro etc. Excetuando-se elementos pré-moldados que chegam na obra, é extremamente difícil garantir um controle de qualidade na etapa de execução sem a devida fiscalização, especialmente em construções habitacionais simples.

2.2.6 Corrosão de armaduras

2.2.6.1 Definição

O aço utilizado para o preparo de concreto armado, em estruturas de construção civil, deve estar devidamente protegido da ação do ambiente para que não sofra corrosão. Tal fenômeno Helene (1986) explica como sendo nada mais que a interação destrutiva de um

material com o ambiente, por reação preponderantemente eletroquímica que ocorre em meio aquoso. Surge quando é formada uma película de eletrólito sobre a superfície do aço e é causada geralmente pela presença de água. Sobre a corrosão eletroquímica, Cánovas (1988) diz:

A corrosão eletroquímica costuma ser a principal causa da deterioração nas armaduras do concreto armado e protendido. O concreto é um material eminentemente básico porque em sua composição se encontram hidróxido de cálcio, sulfatos, álcalis etc. que produzem um meio com pH acima de 12, nas primeiras idades, até 13 nos concretos de mais idade. A armadura nessas condições, está num meio alcalino ideal e, portanto, o aço está em forma passiva; entretanto, por diversas causas, a passividade pode desaparecer em pontos localizados ou completamente. No primeiro caso temos um tipo de corrosão denominada corrosão localizada ou sob tensão e, no segundo, temos a corrosão generalizada. (CÁNOVAS, 1988, p. 67).

De fato, existem vários tipos de corrosão que são descritos na tabela a seguir:

Tabela 5 - Tipos de corrosão

Tipo de corrosão	Características
Uniforme (ou quase uniforme)	Toda superfície do metal se corrói à mesma velocidade (ou com velocidade parecida)
Localizada	Certas áreas da superfície do metal se corroem a velocidade mais elevada que outras por causa da “heterogeneidade” do metal, do ambiente ou da geometria da estrutura como um todo. O ataque pode variar de pouco localizado até a formação de pites (cavidades).
Pites	Ataque fortemente localizado em áreas específicas que leva a formação de pequenos pites (cavidades) que penetram no metal e podem levar à perfuração da parede metálica.
Dissolução seletiva	Um dos componentes de uma liga (em geral, o mais reativo), é consumido seletivamente.
Ação conjunta da corrosão e de um fator mecânico	Ataque localizado ou fratura devido à ação sinérgica de um fator mecânico e da corrosão. Pode manifestar-se, por exemplo, na forma de corrosão-erosão, corrosão sob tensão, corrosão-fadiga.

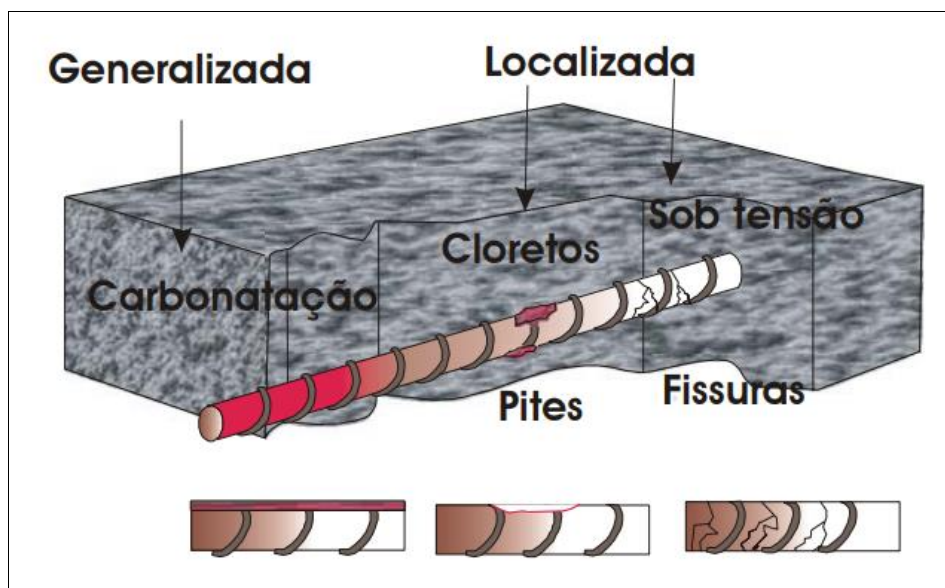
Fonte: Bertolini (2010)

Como exposto acima, a *corrosão uniforme* é aquela que ocorre uniformemente sobre a superfície da estrutura metálica. Possui como consequência o adelgaçamento da parede do

elemento metálico e é a forma de ataque mais comum, embora não seja a mais perigosa, visto que acontece em velocidade relativamente baixa (aproximadamente 100 $\mu\text{m}/\text{ano}$).

Já a *corrosão localizada*, o ataque corrosivo se manifesta em regiões específicas onde a corrosão está acontecendo em velocidade maior que outras.

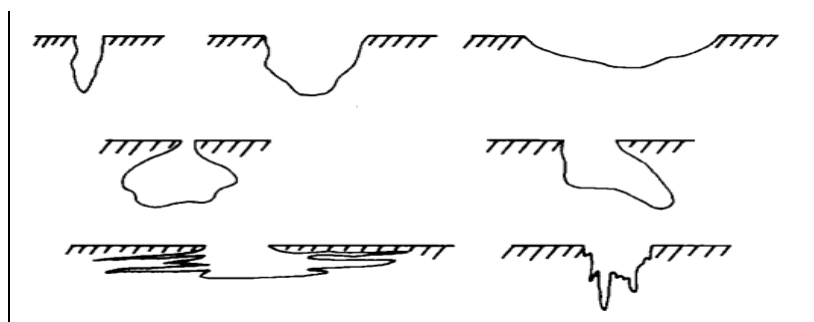
Figura 10 - Corrosão uniforme e localizada



Fonte: Polito (2006)

Se o ataque assumir um caráter penetrante e causar perfuração da estrutura metálica, a corrosão é chamada de *pite* e pode chegar a velocidades de até 1 mm/ano. Tal situação geralmente é ocasionada em materiais passivos diante da ação de cloretos. Gentil (1996) explica que pites são “cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior que o seu diâmetro.

Figura 11 - Formas de pites segundo a ASTM



Fonte: Gentil (1996)

A dissolução seletiva ocorre quando se verifica o ataque corrosivo de apenas um componente de uma liga ou só nas bordas dos grãos cristalinos (como no caso da corrosão intergranular dos aços inoxidáveis).

Sobre a *ação da corrosão associada à solicitação mecânica*, Bertolini (2010) afirma:

Um componente metálico, em geral, é sujeito ao mesmo tempo à ação corrosiva do ambiente e à ação mecânica devida às cargas aplicadas a ele. Na maior parte dos casos, os efeitos da corrosão e das solicitações mecânicas podem ser avaliados separadamente. É, portanto, possível estudar o avanço da corrosão do metal no ambiente em questão (por exemplo, de um corpo de prova não solicitado mecanicamente) e só depois avaliar os seus efeitos no desempenho estrutural. Em alguns casos, contrariamente, verificam-se efeitos sinérgicos entre a corrosão e a ação mecânica. Um exemplo é o dos metais sujeitos a abrasão pelo efeito de substâncias sólidas dispersas em fluido agressivo (por exemplo, partículas de areia na água do mar); neste caso, a ação mecânica devida à ação das partículas sobre a superfície do metal adiciona-se a ação corrosiva do fluido e as consequências podem ser muito maiores do que a simples soma dos efeitos de cada uma das ações tomadas separadamente. (BERTOLINI, 2010, p. 50).

2.2.6.2 O mecanismo da corrosão em meio aquoso

O mecanismo eletroquímico, como supracitado, é o responsável pela maioria dos casos de corrosão em armaduras em concreto. Isso porque em meio seco não existe corrosão eletroquímica, pela falta do eletrólito e em meio saturado não existe entrada de oxigênio pelo fato de os poros estarem preenchidos de água.

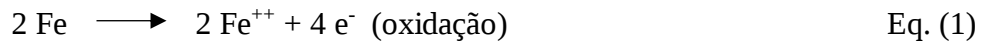
Nesse caso, a corrosão de armaduras em meio aquoso necessita de basicamente quatro processos para ocorrer (BERTOLINI, 2010).

São eles:

- ✓ Reação anódica de oxidação do metal, formando produtos de corrosão e disponibilizando elétrons na rede cristalina do metal;
- ✓ Reação catódica, reduzindo uma espécie química presente no ambiente da reação e consumindo os elétrons produzidos pelo processo anódico;
- ✓ Circulação de corrente no metal, decorrente de fluxo de elétrons na rede cristalina do mesmo, causada pela diferença de potencial entre íons e
- ✓ Circulação de corrente no meio ambiente, formada pela movimentação de elétrons dos íons dissolvidos na solução líquida em contato com a superfície do metal.

O resultado dessa reação é a formação de óxidos e hidróxidos de ferro, produtos de corrosão avermelhados, pulverulentos e porosos, comumente conhecidos como ferrugem.

As reações que regem o aparecimento de tal fenômeno são (HELENE, 1986):



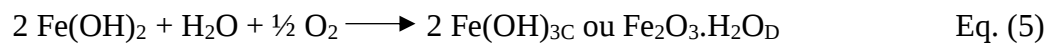
O fenômeno de oxidação descrito acima é o processo no qual ocorre aumento no número de cátions de um íon, ou seja, perda de elétrons.

Ocorre nas zonas anódicas causando a dissolução do metal.

Nas zonas catódicas, em meios aerados e neutros, ocorre a redução, que é o processo de diminuição do número de cátions de um íon, ou seja, ganho de elétrons:



Assim, as equações gerais da formação de ferrugem ficam como descritas a seguir:



onde:

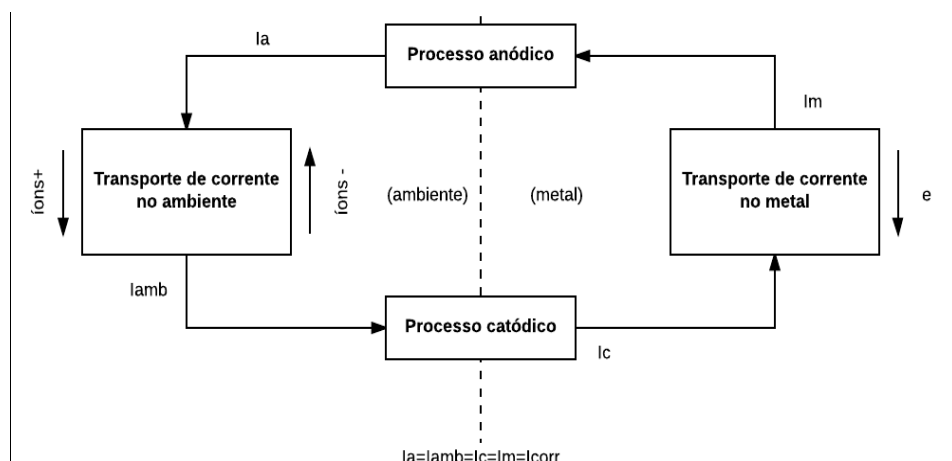
A é o hidróxido ferroso fracamente solúvel;

C é o hidróxido férrico (expansivo) e

D é o óxido férrico hidratado, goetita ou lepidocrocita (expansivo).

As figuras 12 e 13 exemplificam a movimentação elétrica formando corrosão em armaduras de concreto:

Figura 12 - Esquema do processo eletroquímico da corrosão



Fonte: Bertolini (2010)

onde:

I_a é a corrente anódica;

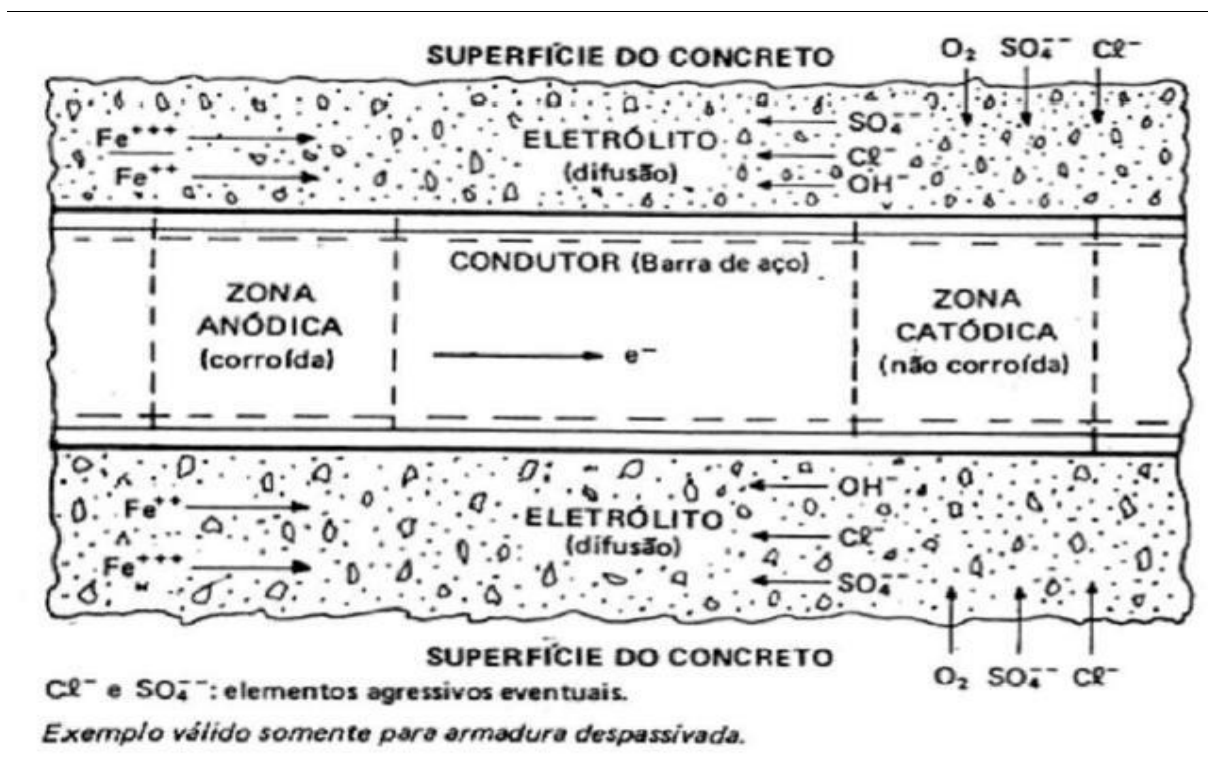
I_c é a corrente catódica

I_m é a corrente circulante no metal

I_{amb} é a corrente circulante no ambiente

I_{corr} é a corrente do processo corrosivo

Figura 13 - Célula de corrosão em concreto armado

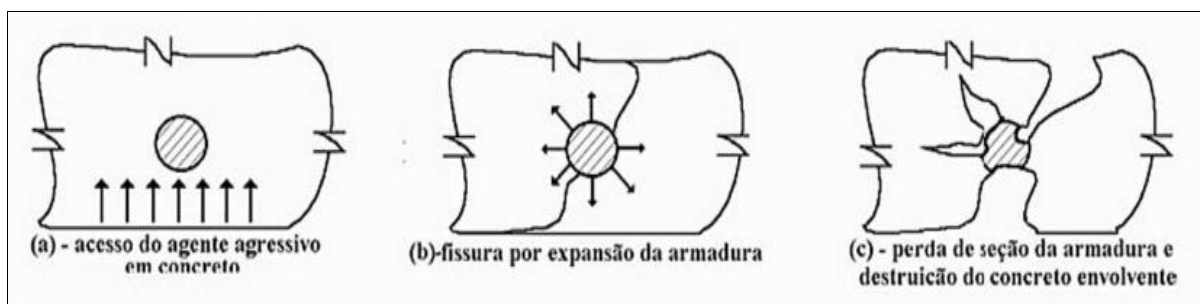


Fonte: Helene (1986)

Como se vê, a corrosão das armaduras é um processo que avança de sua periferia para o seu interior, havendo troca de seção de aço resistente por ferrugem. Este é o primeiro aspecto patológico da corrosão, ou seja, a diminuição de capacidade resistente da armadura, por diminuição da área do aço. (RIPPER, THOMAZ; SOUZA, 1998, p. 68).

Assim como atestado por Souza e Ripper, o processo de degradação do aço dentro do concreto causa outros problemas nas estruturas, como pode ser observado a seguir:

Figura 14 - Instalação do processo de corrosão de uma barra de armadura



Fonte: Souza e Ripper (1998)

A figura 14 (a) demonstra a perda de aderência entre o concreto e o aço diminuindo a resistência inicial do elemento estrutural, enquanto a figura 14 (b) evidencia a desagregação da camada de concreto que envolvia a armadura.

Esse processo ocorre devido a formação de óxido de ferro hidratado (Eq. 5) que para ocupar o seu espaço, exerce uma pressão da ordem de 15 MPa, suficiente para fraturar o concreto.

A figura 14 (c), finalmente, mostra a fissuração completa pela desagregação do concreto.

A perda de seção da armadura, evidenciada na figura 14 (c) anteriormente exibida, demonstra a fragilidade do aço às ações do ambiente pela sua exposição e, dessa forma, está mais suscetível a ataques de íons.

Os íons mais agressivos e frequentes no concreto são os cloretos, Cl^- . Atuam despassivando a armadura e, para isso, precisam estar em forma de íons livres e entrar em contato com água.

Segundo Cánovas (1988), a quantidade crítica de íons cloro é 0,6% para concreto fresco e valores menores para o caso endurecido, sendo que verificou-se que com apenas 0,4% de Cl^- é possível ativar as armaduras.

O autor afirma ainda que íons SO_4^{2-} e S^{2-} também merecem atenção especial. Podem surgir no cimento como consequência de seus compostos ou do ambiente externo, sendo que se ocorrerem devido à primeira possibilidade, não são perigosos, tornam-se de especial interesse, no entanto, quando surgem devido a fatos externos, possibilitando a geração de corrosão localizada.

Nesses casos, se ocorrer contato dos íons mencionados com o CO_2 presente na atmosfera, ocorre uma reação de carbonatação, conceito que é melhor desenvolvido no tópico 2.3.2.

2.2.6.3 Fatores que influenciam a corrosão

Segundo Helene (1986), existem alguns fatores que podem contribuir para o aparecimento de corrosão numa superfície metálica.

Estes fatores podem ser:

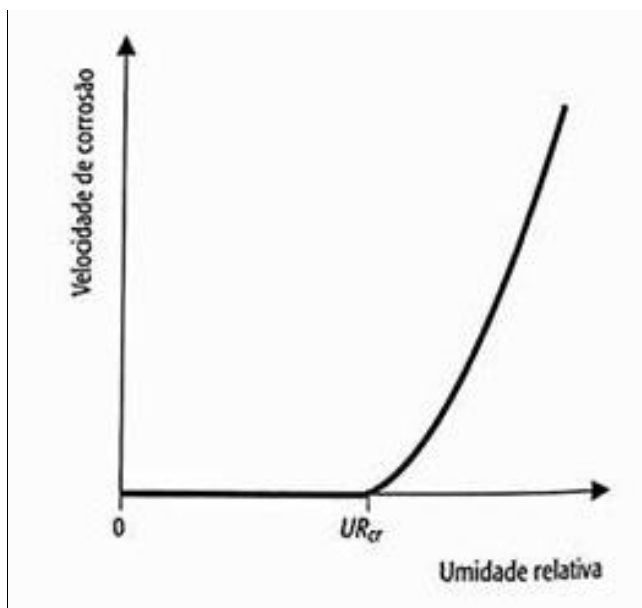
- ✓ Devido a solicitações mecânicas distintas no aço e no concreto de regiões próximas do mesmo componente estrutural;
- ✓ Devido a diferenças na composição química e superfície do aço e
- ✓ Devido a diferenças de aeração causadas por maior ou menor compacidade e qualidade do concreto.

O autor ressalta, entretanto, que tais fatores podem não ser suficientes para acarretar corrosão, de forma que podem atuar como contribuintes para o surgimento do fenômeno à medida que o concreto “deixa de proteger a armadura ou haja uma forte ação do meio ambiente, destruindo, parcial ou totalmente, essa proteção – para aumentar o risco de corrosão ou facilitar a aceleração de uma corrosão já iniciada. ”

A umidade relativa do ar também é um fator que influencia de forma expressiva a corrosão de armaduras de concreto visto que quanto mais umidade o ambiente apresentar, mais umidade adentra o concreto por sua porosidade e, considerando que o ar está contaminado com diversos poluentes, sua entrada pode facilitar a ocorrência de reações agressivas em seu interior, causando patologias.

A figura 15 demonstra a velocidade de corrosão em função da umidade relativa do ar, U.R. do ar, onde apresenta-se uma umidade crítica UR_{cr} , para além da qual forma-se, por condensação, um filme líquido capaz de provocar a corrosão do aço.

Figura 15 - Corrosão de metal exposto a atmosfera em função da U.R.



Fonte: Bertolini (2010)

Assim, o quadro abaixo descreve a quantidade de água ideal para o concreto em relação à umidade relativa do ar:

Tabela 6 - Porcentagem ideal de água em concreto em relação à U.R. do ar

U.R. do ar (%)	Umidade do concreto (%)	Litros d'água/m ³
45	3,0	70
70	4,0	90
95	8,0	190

Fonte: Marcelli, 2007

onde a umidade relativa do ar pode ser compreendida como:

Tabela 7 - Umidade relativa do ar segundo grau de saturação

Tipo de ar	Umidade relativa U.R. (%)
Seco	Até 30
Normal	Entre 50 e 60
Úmido	Entre 80 e 90
Saturado	100

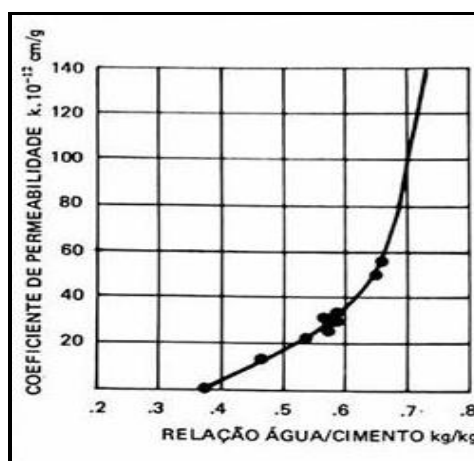
Fonte: Marcelli (2007)

Além da U.R, pode-se destacar como contribuinte para a corrosão de armaduras a porosidade do concreto que, se não executado de forma adequada relativamente ao adensamento e lançamento, pode não garantir o aprisionamento suficiente de ar.

A permeabilidade da pasta de cimento depende, segundo Helene (1986), da sua relação água/cimento e do seu grau de hidratação.

A figura 16 mostra o comportamento da permeabilidade com o aumento da relação A/C.

Figura 16 - Influência da relação A/C na permeabilidade de pastas de cimento altamente hidratadas



Fonte: Helene (1986)

O gráfico acima evidencia que quanto maior for a relação água/cimento do preparo de um determinado concreto, maior é a sua permeabilidade.

Esse fato merece atenção especial em projetos de construções localizadas em ambientes cuja presença de cloretos tenha sido identificada.

A absorção de água pelo concreto é outro fator que pode influenciar a ocorrência de corrosão em armaduras.

Tal fenômeno é um dos mais difíceis de serem controlados uma vez que quanto menor o diâmetro dos capilares, maior e mais rápida é a absorção de água.

Por um lado, a redução na relação água/cimento aparentemente reduz a absorção, já que torna o concreto mais denso e compacto, por outro, entretanto, quanto mais denso e compacto estiver o concreto, menor é o diâmetro dos capilares e, conseqüentemente, maior é a absorção de água, como já mencionado.

Por isso Helene (1986) aponta que a melhor opção para esse efeito é a adição de incorporadores de ar e aditivos de ação hidrofugante.

2.2.7 Carbonatação

Nas áreas onde existe algum tipo de fissuração da estrutura ocorre naturalmente o surgimento de pilhas de pH diferencial.

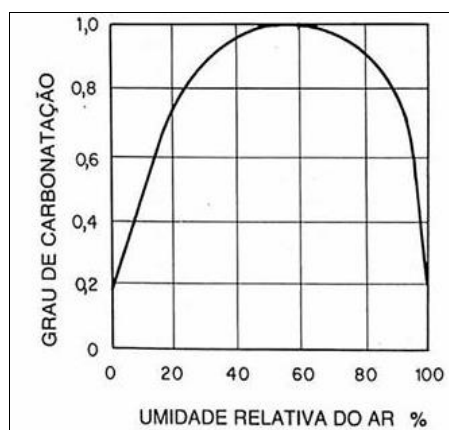
Nessas regiões, ocorre carbonatação proveniente do CO_2 presente na atmosfera em contato com o hidróxido de cálcio fazendo com que o pH atinja valores próximos a 9, despassivando a armadura pela perda de alcalinidade do meio.

A reação principal é dada por:



O grau de carbonatação depende da U.R. do ar, mas não implica necessariamente em corrosão, caso a estrutura esteja seca.

Figura 17 - Grau de carbonatação em relação a U.R. do ar



Fonte: Cánovas (1988)

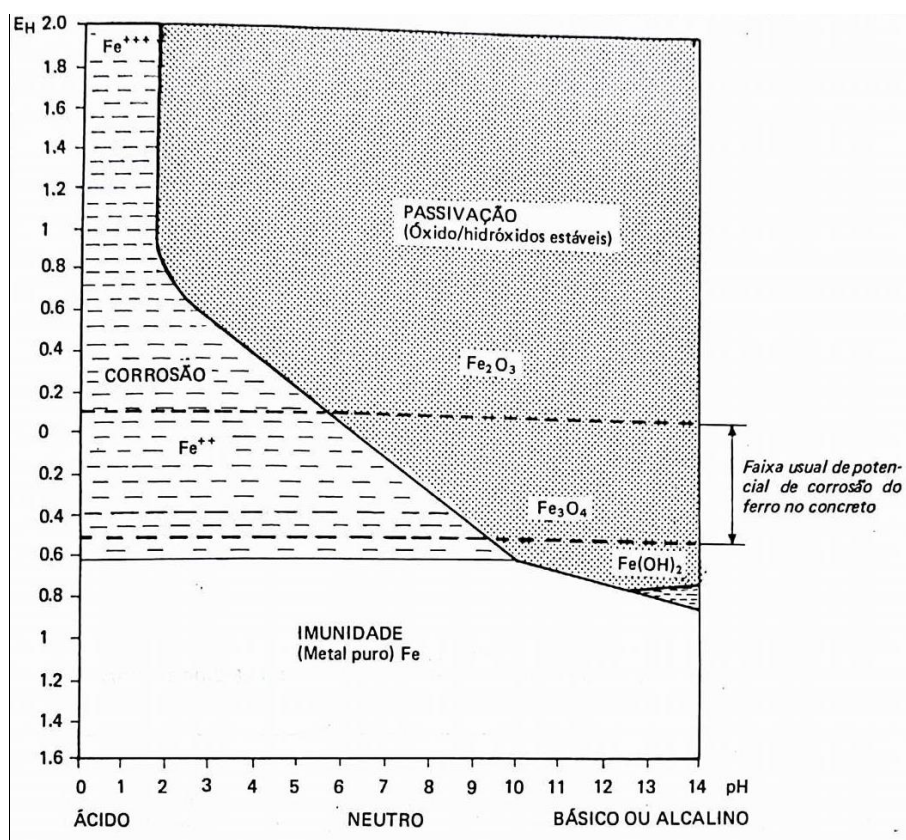
Cánovas (1988) afirma que “a resistência à corrosão existe enquanto o hidróxido de cálcio não for neutralizado por carbonatação, fazendo com que o pH desça abaixo do número crítico de 11,8. ”

No gráfico da figura 18 pode-se perceber que o risco de corrosão para aço não protegido se encontra na zona 1.

Quando existe tal proteção o potencial se eleva visto que a passivação é maior, atingindo a zona 2.

Quando, entretanto, o concreto estiver submetido à ação da água do mar, o potencial cai para a zona 3, onde ocorre corrosão.

Figura 18 - Equilíbrio de potencial pH para o sistema FeH2 a 25°C

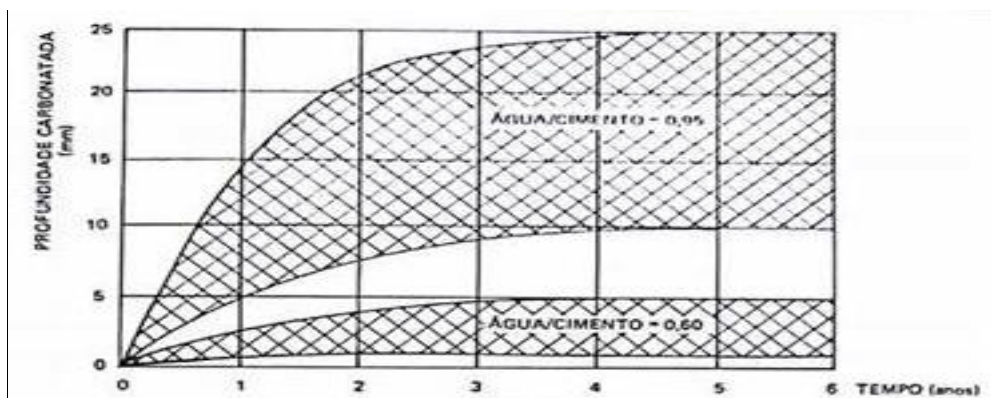


Fonte: Helene (1986)

Além disso, pode-se avaliar a profundidade da carbonatação de acordo com a relação água/cimento de um concreto.

Além disso, Helene (1986) aponta que a profundidade tende a ser alta logo no início do processo, tendendo assintoticamente a uma profundidade máxima, devido a hidratação crescente do cimento, que aumenta, enquanto houver água suficiente, a compacidade do concreto, dificultando a passagem de CO_2 .

Figura 19 - Variação da profundidade de carbonatação em função da relação A/C



Fonte: Helene (1986)

A figura 20 mostra os efeitos da corrosão ao longo do tempo em um elemento estrutural submetido à carbonatação.

Figura 20 - Evolução do tempo na degradação de uma estrutura de CA, devido a corrosão por carbonatação

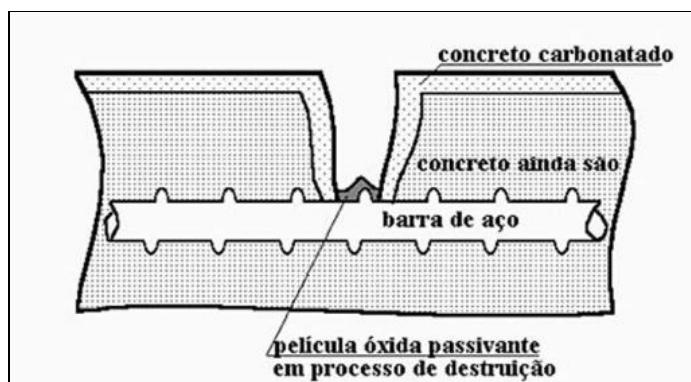


Fonte: Bertolini (2010)

Segundo a figura acima, num primeiro instante, a armadura está passivada e não corrói. A carbonatação então penetra pela superfície do concreto no cobrimento do mesmo. A corrosão inicia-se quando a frente de carbonatação chega à superfície da armadura. O aço despassivado torna-se, dessa forma, suscetível à corrosão com velocidade dependente da exposição ambiental.

Ao longo do tempo, os produtos de corrosão podem causar fissuração e deslocamento do cobrimento, comprometendo o desempenho da estrutura.

Figura 21 - Carbonatação condicionada pela fissuração



Fonte: Souza e Ripper (1998)

Dessa forma, é necessária a identificação da ocorrência de carbonatação na obra, descrita a seguir de acordo com o que explica Cánovas (1988).

A verificação da presença de íons cloro no concreto pode ser feita qualitativamente passando pela superfície do concreto na obra uma solução de 1% de nitrato de prata.

A presença desses íons é indicada pela coloração branca onde é aplicada a solução.

Pode-se também, realizar a determinação de carbonatação sobre um pedaço de concreto recém extraído.

Para isso, basta aplicar uma solução fraca de fenolftaleína sobre sua superfície e se a região mudar de cor para vermelho, indica a existência de hidróxido de cálcio que caracteriza uma carbonatação incompleta.

Caso contrário, indica que toda carbonatação já ocorreu.

2.2.8 Fissuras

Fissuras são provocadas, entre outros, segundo Thomaz (1989) pelos seguintes fenômenos:

- ✓ Movimentações provocadas por variações térmicas e de umidade;
- ✓ Atuação de sobrecargas ou concentração de tensões;
- ✓ Recalques diferenciais das fundações;
- ✓ Retração de produtos à base de ligantes hidráulicos e
- ✓ Alterações químicas de materiais de construção.

As *movimentações térmicas* estão relacionadas às propriedades físicas dos materiais e a variação de temperatura a que são submetidas.

Podem, segundo o autor, ocorrer em função de:

- ✓ Junção de materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica;
- ✓ Exposição de elementos a diferentes solicitações térmicas naturais e
- ✓ Gradiente de temperaturas ao longo de um mesmo componente.

Já na *atuação de sobrecargas*, o autor alerta que nem toda estrutura submetida às cargas, previstas ou não em projeto, apresenta necessariamente algum tipo de fissuração.

A fissura ocorre quando cargas de projeto não distribuem forças de acordo com o previsto ou mesmo quando o dimensionamento do elemento estrutural não atende a todas as solicitações que recebe.

A respeito de fissuras por *recalques de fundação*, o autor atenta para o fato de o solo não possuir carga e deformabilidade constantes, pois dependem de fatores como o tipo e o estado do solo, a disposição do lençol freático, a intensidade de carga aplicada, do tipo de fundação, da cota de apoio da fundação, das dimensões, do formato da placa carregada, da interferência de fundações vizinhas, entre outros.

Dessa forma, o comportamento de um edifício em relação à ocorrência de recalques diferenciais é função de relações complexas entre sua estrutura, a estrutura da fundação e do solo de suporte.

Thomaz (1989) afirma:

[...] uma estrutura pode ter comportamento flexível quando apoiada sobre um solo pouco deformável, ao passo que tende a comportar-se como um corpo rígido se apoiada em solo muito deformável. Em geral, ante a ação de recalques diferenciados, há grande probabilidade das estruturas lineares desempenharem-se de maneira flexível, predominando nas paredes de fechamento tensões de cisalhamento, enquanto que nas alvenarias portantes, não armadas, apresentam comportamento muito mais próximo da rigidez. (THOMAZ, 1989, p. 85).

De forma geral, fissuras causadas por recalques diferenciais são inclinadas e podem apresentar esmagamentos localizados em forma de escamas.

Recalques acentuados, além disso, são facilmente perceptíveis pela variação de abertura da fissura.

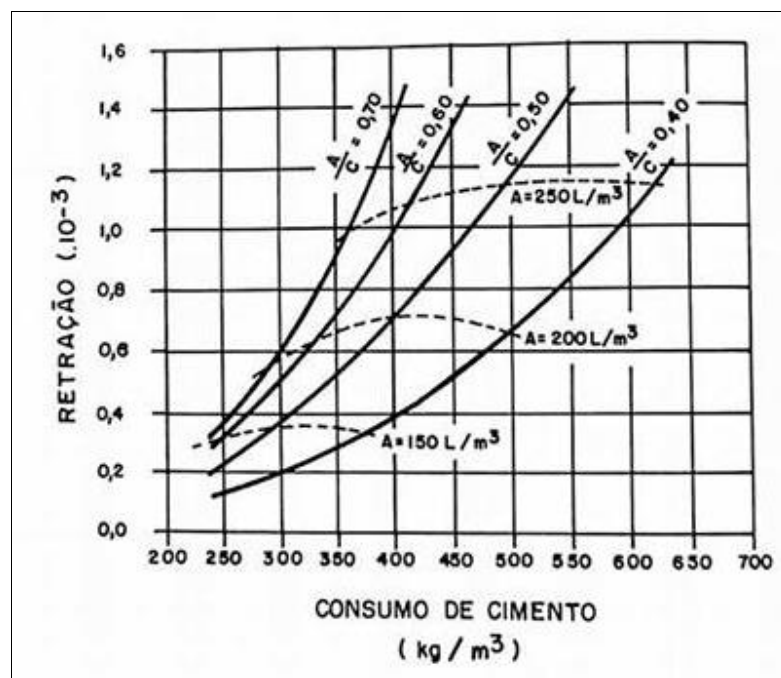
A respeito das fissuras causadas por *retração de produtos à base de ligantes hidráulicos*, o autor salienta que o que mais acentua a retração é o excesso de água adicionado à confecção do concreto para proporcionar melhor trabalhabilidade da pasta.

Segundo ele, existem três tipos de retração:

- ✓ *Retração química* que se dá pela redução de volume, devido a grandes forças interiores de coesão e por isso a água combinada quimicamente (22 a 32% de água em relação a massa do cimento) sofre contração de cerca de 25% do seu volume original;
- ✓ *Retração de secagem* onde a água em excesso utilizada para a preparação do concreto fica livre no interior da massa, evaporando-se posteriormente e provocando com essa evaporação forças capilares equivalentes a uma compressão isotrópica da massa, reduzindo seu volume;
- ✓ *Retração por carbonatação* onde a cal hidratada liberada nas reações de hidratação do cimento reage com o CO_2 da atmosfera, produzindo CaCO_3 . Tal reação é responsável pela redução de seu volume original.

A retração é, portanto, influenciada principalmente pela relação água/cimento, como demonstrado abaixo:

Figura 22 - Retração do concreto em função do consumo de cimento e relação A/C



Fonte: Helene (1980)

Finalmente, fissuras causadas por alterações químicas de materiais de construção são aquelas que, segundo o autor, ocorrem devido a três principais fatores, a saber:

- ✓ Hidratação retardada de cales,

- ✓ Ataque por sulfatos e
- ✓ Corrosão de armaduras.

Cales mal hidratadas apresentam altos teores de óxidos livres de cal e magnésio, por isso qualquer tipo de contato com água que a estrutura venha a receber ao longo de sua vida útil promove uma reação de hidratação desses óxidos, reação essa que é expansiva em até 100% de seu volume original.

A expansão decorrente da reação de hidratação provoca fissuras nas estruturas, que ocorrem geralmente nas proximidades do topo de parede, por exemplo, onde são menores os esforços de compressão oriundos do seu peso próprio.

Já no caso do ataque por sulfatos, o autor destaca que é necessária a presença de cimento, água e sulfatos solúveis, uma vez que estes últimos podem reagir com o aluminato tricálcico (componente comum a cimentos), formando o sulfoaluminato tricálcico (reação expansiva).

Sulfatos podem provir de diversos lugares, como solo, águas contaminadas, entre outros.

Dessa forma, a utilização conjunta de cimento e gesso pode ser perigosa.

O aspecto comum de fissuras advindas dessa razão é de trincas paralelas com expansão lateral de concreto quando as mesmas encontram resistência ao longo de um eixo, como em pilares e vigas, por exemplo.

Estruturas marinhas são altamente suscetíveis a ataques por sulfatos, pelos teores consideráveis de sulfatos presentes em água salgada, principalmente elementos sujeitos ao refluxo da maré.

O caso da corrosão de armaduras está sempre relacionado ao mau cobrimento dos elementos metálicos, que por vezes são inseridos próximos demais a superfície dos componentes estruturais, ou de concretos mal adensados que facilitam a penetração de água e ar na estrutura, desencadeando a corrosão.

As reações de corrosão, como supracitado, produzem óxidos de ferro, de volume maior que o metal que os originou, provocando fissuramento e posterior lascamento do concreto nas regiões próximas às armaduras.

2.3 ENSAIOS INFORMATIVOS SOBRE OS MATERIAIS DA ESTRUTURA

Ensaaios informativos indicam a qualidade de uma estrutura ou elemento de concreto por haver-se encontrado falha no mesmo.

Dessa forma, Cánovas (1988) aponta que a necessidade desses ensaios pode ser motivada por:

- ✓ Resistência estimada do concreto inferior à característica e em proporção tal que obrigue ao exame e comprovação da estrutura;
- ✓ Mudança de uso da estrutura, ocasionando solicitações superiores sobre os elementos estruturais e que obrigue ao conhecimento da capacidade resistente atual, a fim de determinar se é preciso ou não um reforço;
- ✓ Comportamento inadequado de uma estrutura em serviço, apresentando deficiência, fissuras ou deformações funcionais superiores ao projeto original obrigando ao conhecimento das causas que produzem tais alterações;
- ✓ Determinação da capacidade residual de uma estrutura que sofreu uma ação perigosa acidental, tal como incêndio, sobrecarga eventual não prevista, impacto por acidente etc. e
- ✓ Recalques e necessidade de conhecer as causas que os motivaram.

Existem, portanto, alguns tipos comuns de ensaios possíveis para apuração de informações sobre a estrutura estudada.

Os mais conhecidos e utilizados são os ensaios de rompimento de corpos de prova, mas pode-se também optar por ensaios *esclerométricos* e ensaios *ultrassônicos*.

Os ensaios de extração e rompimento de corpos de prova são utilizados quando deseja-se aferir a resistência à compressão do concreto.

Nesse procedimento, regulamentado pela NBR 7680-1/2015, utilizam-se brocas rotativas diamantadas que extraem testemunhos circulares de concreto de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, para posterior carregamento até ruptura em prensa de laboratório para conhecer-se a resistência do concreto de obra.

Marcelli (2007) afirma que com base nos valores obtidos de resistência máxima à ruptura “pode ser feito o cálculo de resistência característica de um lote de concreto à compressão, segundo as normas correspondentes utilizadas no cálculo do projeto estrutural.”

O ensaio esclerométrico por sua vez é um ensaio de característica não-destrutiva que se destina a determinação da resistência superficial do concreto.

O mais comum aparelho de medição utilizado em ensaios de esclerometria é o esclerômetro Schmidt, que segundo Cánovas (1988):

[..] mede a resistência do concreto mediante a volta de uma massa de aço que, por uma mola, golpeia um pino posto em contato com a superfície do concreto. Produzindo o impacto, a massa rebate no extremo oposto do pino, impelindo em seu movimento um indicador que, ao deslocar-se em uma escala graduada de 20 a 90, marca um valor, que se denomina “índice esclerométrico” e que é a relação entre a altura da volta e a escala total do aparelho. (CÁNOVAS, 1988, p. 467).

Já os ensaios ultrassônicos, como o próprio nome sugere, utilizam-se da propagação de ondas elásticas através do material concreto.

Tal ensaio permite estabelecer o módulo de deformação dinâmico da estrutura, calculando-se o tempo que leva para o impulso emitido atravessar uma determinada espessura de concreto.

2.4 TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO E/OU REFORÇO DE ESTRUTURAS

Lichtenstein (1986), sugere que a compreensão de um problema patológico passa por três etapas, a saber:

✓ *Primeira etapa:*

Levantamento de subsídios, onde procura-se levantar, acumular e organizar informações consideradas relevantes a compreensão do problema como um todo;

✓ *Segunda etapa:*

Diagnóstico da situação, que é o entendimento do assunto estudado, procurando conhecer as causas e efeitos que caracterizam o estado patológico;

✓ *Terceira etapa:*

Definição de conduta, que é o plano de ação para resolver o problema, definindo, para isso, meios, materiais e métodos a serem utilizados.

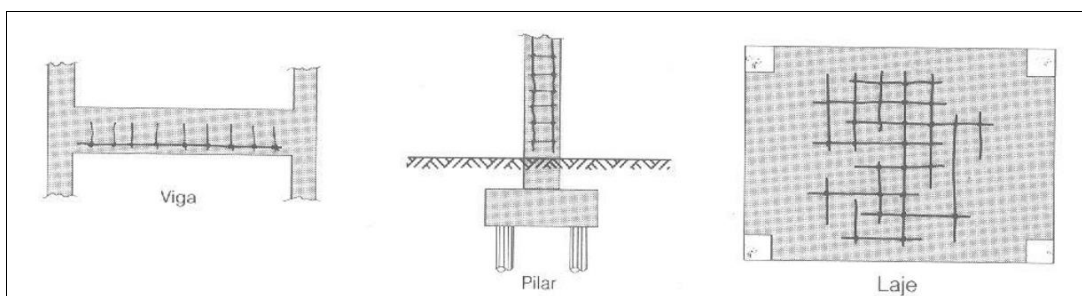
Dessa forma, compreendidos os fatores que levaram a estrutura a apresentar algum tipo de patologia e, sabido seu prognóstico, resta definir uma possível solução para a situação adversa encontrada.

São dadas, a seguir, sugestões de intervenção em estruturas segundo a manifestação patológica que apresentam.

2.4.1 Recuperação de armaduras corroídas

A manifestação típica de corrosão em armaduras é como segue:

Figura 23 - Manifestação típica de corrosão em diferentes elementos estruturais



Fonte: Helene (1992)

Tal patologia é causada, como já citado, por fatores como alta porosidade ou permeabilidade do concreto, ou má execução, ou ainda falta de cobrimento suficiente.

É importante ressaltar sobre este último, que o cobrimento possui dois papéis fundamentais na proteção das armaduras, sendo as proteções *física* e *química*.

A *proteção física* é garantida quando o concreto é de alta compacidade, sem “ninhos” e com teor de argamassa adequado e homogêneo, pois confere impermeabilidade a superfície do concreto.

A *proteção química* ocorre devido à camada passivadora oriunda do ambiente altamente alcalino do concreto.

A função do cobrimento segundo Helene (1986) é portanto, proteger a armadura contra danos mecânicos, mantendo sua estabilidade.

Uma vez conhecidas as causas da corrosão de armaduras, faz-se necessário corrigi-las.

Dessa forma, Machado (2002) descreve sumariamente as etapas básicas de reparo de uma estrutura corroída, como segue:

- ✓ Remoção do concreto desagregado junto às armaduras corroídas;
- ✓ Regularização do perímetro do trecho de substrato a ser recomposto;

- ✓ Limpeza da corrosão das barras da armadura;
- ✓ Passivação das armaduras recuperadas e
- ✓ Recomposição do substrato de concreto.

A remoção do concreto desagregado pode ser feita por simples escarificação manual ou mecânica, com ponteiro, talhadeira ou marreta, com o intuito de expor toda a região da armadura que sofreu corrosão.

Em seguida, realiza-se a limpeza da armadura corroída, podendo-se utilizar vários recursos, como jato de água fria ou quente, vapor, entre outros.

Tabela 8 - Procedimentos para limpeza das superfícies do concreto instantes antes de aplicar o material de reforço/restauro

Item	Procedimentos	Limpeza	
		Concreto c/ superfície	
		Seca	Úmida
01	Jato de água fria	Inadequado	Adequado
02	Jato de água quente	Inadequado	Adequado
03	Vapor	Inadequado	Adequado
04	Soluções ácidas	Inadequado	Aceitável
05	Soluções alcalinas	Inadequado	Adequado
06	Remoção de óleos/graxas	Inadequado	Inadequado
07	Jato de ar comprimido	Adequado	Aceitável
08	Solventes voláteis	Adequado	Adequado
09	Saturação de água	Inadequado	Inadequado
10	Aspiração a vácuo	Adequado	Inadequado

Fonte: Marcelli (2007)

Uma vez limpa, pode-se simplesmente recompor a seção cortada ou então aplicar previamente algum produto com alto teor de zinco, por exemplo, para garantir proteção galvânica no aço.

É importante ressaltar, que antes da aplicação de qualquer produto protetor do aço deve-se realizar primeiramente uma inspeção minuciosa da ferragem para avaliar se a perda de seção sofrida devido a corrosão é significativa.

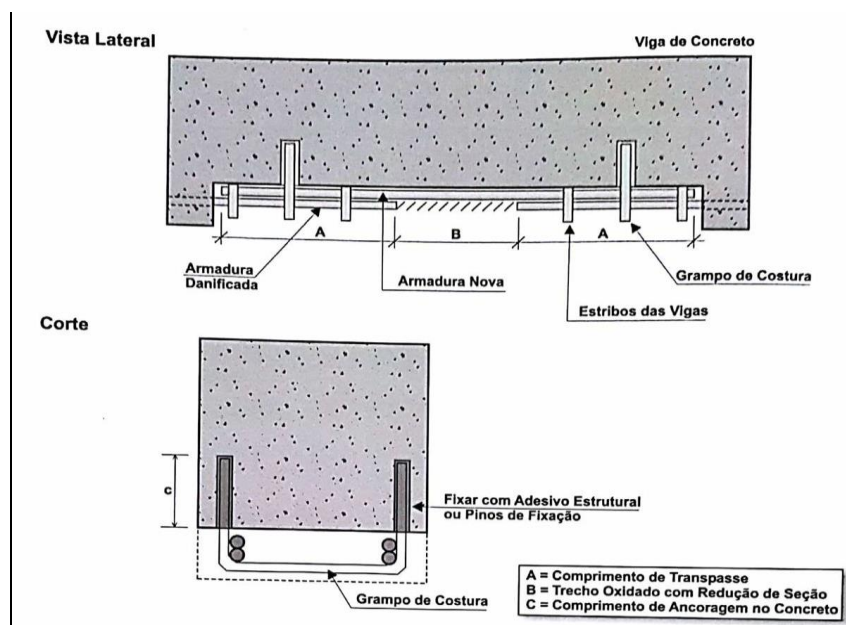
Em alguns casos, antes de recompor a seção cortada é necessário acrescentar barras de aço de reforço ou até mesmo substituir o aço corroído.

Concluída a inspeção e havendo necessidade de reforço da barra de aço, pode-se acrescentá-las por meio de emendas por transpasse, ou emenda com luvas ou até mesmo com solda.

Emendas por transpasse são recomendadas em peças que permitem aberturas suficientes para colocação de outra barra na mesma.

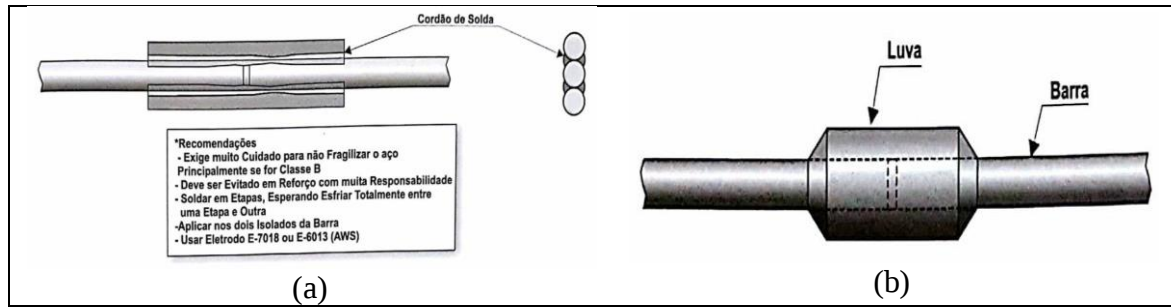
Marcelli (2007) aponta que em emendas com luvas utilizam-se luvas de pressão e emendas com soldas são as mais simples de executar, embora deva-se tomar o cuidado para evitar que o calor gerado pelo processo de solda não altere as propriedades da estrutura do aço devendo-se soldar a peça de forma alternada esperando que o aço esfrie entre uma passada e outra.

Figura 24 - Emenda com transpasse



Fonte: Marcelli (2007)

Figura 25 - Emendas; (a) com solda; (b) com luvas



Fonte: Marcelli (2007)

Se a armadura não precisar de reforço, como mostrado acima, pode-se seguir as etapas para sua recuperação como descrito na figura 26 abaixo:

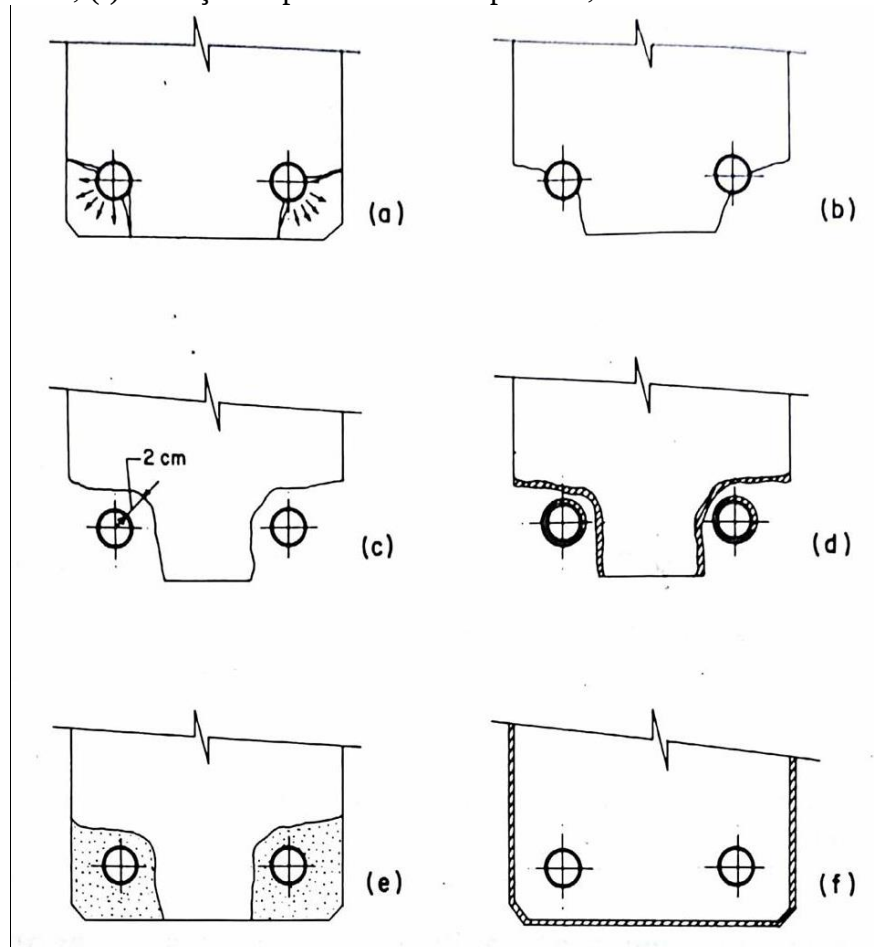
Figura 26 - Etapas de uma recuperação em viga danificada por corrosão;

(a) Fissuras nos cantos da seção; (b) Eliminação de cantos; (c)

Exposição da armadura e limpeza da mesma; (d) Aplicação de

proteção na armadura e concreto, se necessário; (e) Restauração de

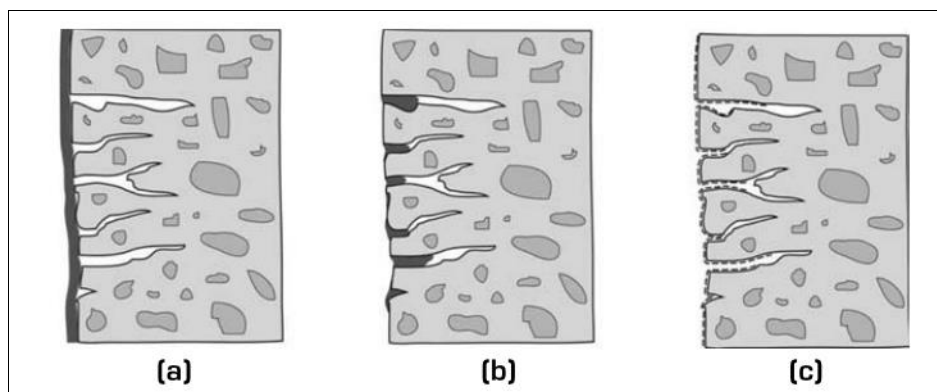
cantos; (f) Proteção impermeável da superfície, se necessário



Fonte: Cánovas (1988)

No caso de necessidade de proteger-se a superfície do concreto pode-se utilizar de formadores de película ou hidrofugante de superfície ou até mesmo bloqueadores de poros.

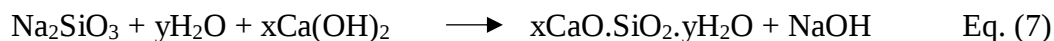
Figura 27 - Formas de proteger a superfície do concreto; (a) formador de película; (b) bloqueador de poros; (c) hidrofugante de superfície



Fonte: Revista Concreto e Construções (2008)

Formadores de película podem ser simples tintas ou vernizes, que formam película uma vez aplicados com camada delgada em superfícies.

Bloqueadores de poros são segundo a IBRACON (2008), produtos compostos por silicatos, como silicato de sódio, por exemplo, segundo a equação:



A reação ocorrida acima forma uma camada menos porosa que o concreto tornando-o menos permeável a água.

Hidrofugantes são os que menos interferem nas características do concreto, pois destinam-se a simplesmente proteger a entrada de água e ar pelos poros por meio de película que é capaz de acompanhar a porosidade existente na estrutura, como mostrado acima.

2.4.2 Recuperação de fissuras

O trabalho de se identificar a causa de uma fissuração nem sempre é simples.

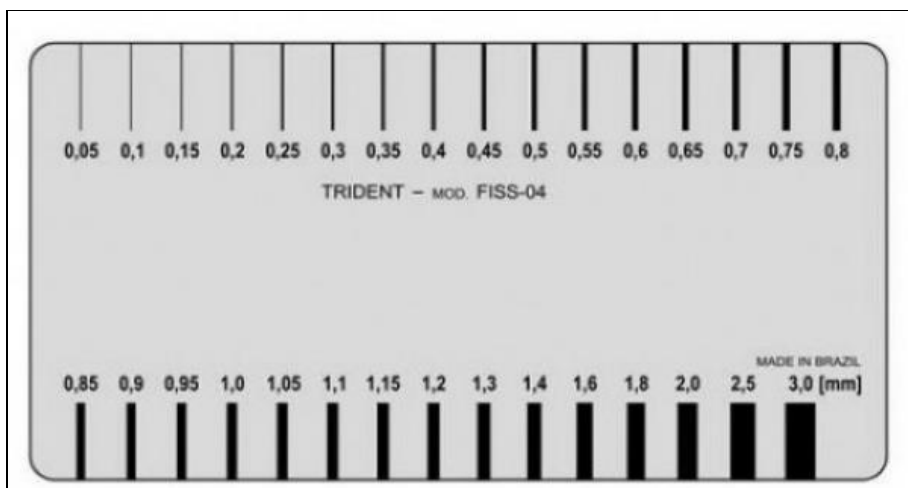
Chand (1979 apud THOMAZ, 1989, p. 151) afirma que uma causa pode provocar diversas configurações de trincas tanto quanto uma trinca pode representar diversas causas.

Por isso, o BRE (1978 apud THOMAZ, 1989, p. 152) sugere a avaliação de diversos fatores, entre eles:

- ✓ Incidência, configuração, comprimento, abertura e localização da trinca;
- ✓ Idade aproximada da trinca, do edifício e época em que foi construído;
- ✓ Se a mesma aprofunda-se por toda espessura do componente trincado;
- ✓ Se trinca semelhante aparece em componente paralelo ou perpendicular àquele em exame;
- ✓ Se trinca semelhante aparece em pavimentos contíguos ou edifício vizinho;
- ✓ Se o aparecimento da trinca é intermitente ou se sua abertura varia sazonalmente;
- ✓ Se a trinca já foi reparada anteriormente;
- ✓ Se ocorreu alguma modificação significativa nos arredores da obra;
- ✓ Se existe no entorno da trinca outras patologias como umidade, descolamento, manchas de ferrugem e/ou bolor, eflorescências etc.
- ✓ Se existe nas proximidades tubulações ou eletrodutos embutidos;
- ✓ Se existem na obra caixilhos comprimidos;
- ✓ Se as trincas manifestam-se preferencialmente em alguma das fachadas da obra;
- ✓ Entre outros.

Medidas simples também podem ser adotadas, como avaliação da abertura de fissura por meio de um fissurômetro que é uma espécie de régua com aberturas comuns de fissuras, como pode ser visto na figura 28:

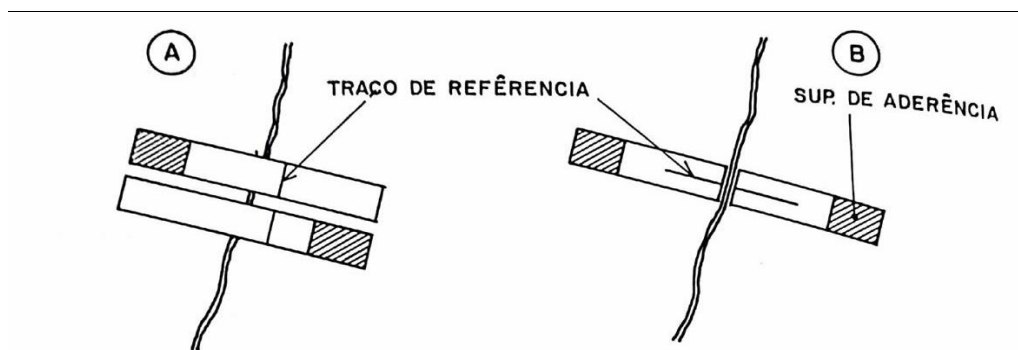
Figura 28 - Fissurômetro



Fonte: Megadestec (2017)

Além disso, é possível utilizar como referência as chamadas testemunhas feitas de material rígido que ao se fissurarem indicam a continuidade do movimento.

Figura 29 - Testemunhas com traços de referência; (a) indicam deslocamentos na horizontal; (b) indicam deslocamentos na vertical



Fonte: Thomaz (1989)

Em geral, fissuras causadas por retração do concreto armado não são propensas a causar corrosão de armaduras.

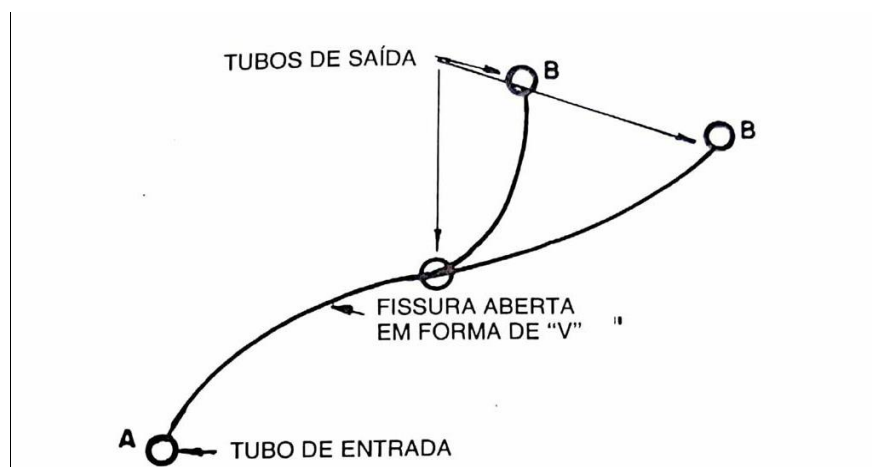
Nos casos, entretanto, em que existem coberturas aparentes pelo elevado nível de fissuração, recomenda a proteção da peça com pinturas flexíveis, incorporando-se a peça, sempre que possível, telas de náilon ou polipropileno.

Pode-se também, em locais onde a fissura é pronunciada e a estanqueidade é requerida, reparar as trincas por meio de injeção de resina epoxídica, preferencialmente utilizando esse método para trincas com aberturas expressivas.

Nesse caso segundo Thomaz (1989), abrem-se sulcos em formato de V, aprofunda-se os sulcos por meio de broqueamento, deixando uma profundidade de aproximadamente 5 cm.

Em seguida realiza-se a limpeza dos sulcos, inserem-se os tubos de injeção e aplica-se a resina superficial e inferior. Após 48h os tubos plásticos podem ser retirados mediante corte e broqueamento onde os furos remanescentes são preenchidos com massa epoxídica.

Figura 30 - Localização dos tubos de injeção na fissura



Fonte: Cánovas (1988)

Outro tipo de recuperação de fissuras é a *cicatrização*.

Nesse processo, as fissuras denominadas “mortas”, isto é, que não se movimentam mais, fecham-se por conta própria e ocorrem geralmente em elementos de concreto saturados de água, uma vez que esta não circula pela fissura.

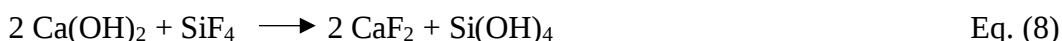
A cicatrização ocorre devido à carbonatação do óxido e hidróxido cálcico do cimento, pela atuação do anidrido carbônico do ar e água.

Nessa reação, os cristais de carbonato de cálcio se encaixam entre si, gerando forças de aderência mecânica e química.

Tal processo segundo Cánovas (1988) ocorre em aproximadamente 90 dias e requer constante saturação e estabilidade da estrutura.

Em fissuras de abertura inferior a 0,2 mm, Cánovas (1988) cita também que é possível realizar seu reparo por meio da injeção de gás tetrafluor-silicato nas fissuras. Esse gás em contato com a cal liberada na hidratação do cimento forma fluorsilicato de cálcio, que é um componente insolúvel, fechando a fissura de dentro para fora e pode até restabelecer grande parte da resistência à tração do concreto naquele ponto.

A fórmula que rege tal reação é dada por:

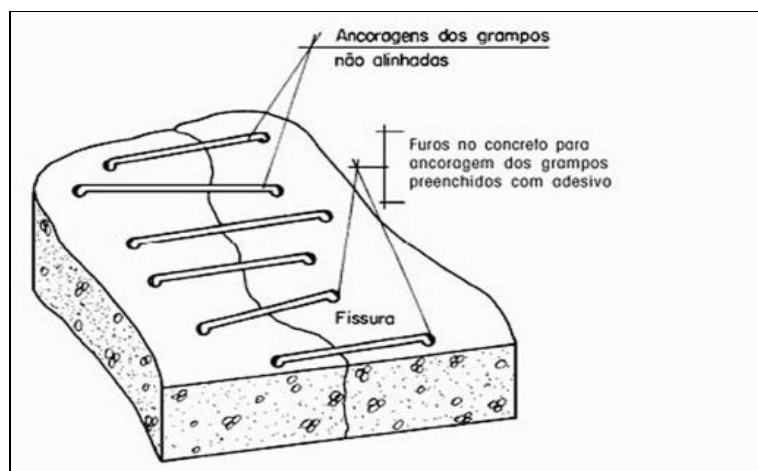


Existe ainda, um método de costura de fissuras, denominado “*grampeamento*” que são geralmente utilizados quando há necessidade de dispor uma armadura adicional na região que sofreu tração excessiva ao ponto da fendilhação.

Souza e Ripper (1998) afirmam que a técnica é de discutível aplicação caso não haja perfeita confirmação da necessidade da armadura mencionada, uma vez que colocada, aumenta muito a rigidez da peça no local da fissura e, se o esforço continuar pode provocar aparecimento de fissura adjacente, não resolvendo, portanto, o problema como um todo.

Se decisão for aplicar essa técnica, deve-se atentar para a colocação desalinhada dos grampos de forma a não produzirem esforços em linha na região.

Figura 31 - Grampeamento desalinhado



Fonte: Souza e Ripper (1998)

2.4.3 Reforço de elementos estruturais por aumento de seção

Um dos métodos mais empregados no Brasil, por conta de seu baixo custo dos materiais de reposição em relação a outros métodos possíveis e também pela própria tradição de uso do mesmo, é o reforço de elementos estruturais por meio de aumento de seção dos mesmos, onde são feitos cálculos para o novo dimensionamento do elemento estrutural segundo às cargas que precisa suportar.

De particular interesse deste trabalho é o reforço de pilares por aumento de seção.

A respeito do reforço de estruturas com concreto armado, Cánovas (1988) afirma:

O reforço com concreto armado tem a vantagem de que este trabalha unido ao pilar inicial, por causa da aderência que existe entre os dois concretos; desta forma, evita-se o surgimento de efeitos secundários, que podem atuar sobre as lajes, criando nelas esforços cortantes, que, às vezes, podem ser importantes, como ocorre no caso de reforços realizados com perfis laminados. (CÁNOVAS, 1988, p. 300).

Souza e Ripper (1998), afirmam, ainda, que o melhor método para reforço de pilares é o cintamento (aumento de seção pela mudança de pilar retangular para circular) dos mesmos:

O projeto de reforço consiste, nesse caso, em se calcular um novo pilar cintado, que seja capaz de absorver a carga que se quer introduzir no elemento estrutural somada ao carregamento existente, ou seja, transformando-se o pilar existente em um pilar cintado. As armaduras longitudinais existentes são consideradas como contribuindo para a resistência total do pilar cintado. Admite-se como necessária a consideração de um coeficiente de majoração das cargas superior ao usual. (RIPPER, THOMAZ; SOUZA, 1998, p. 216).

Reforços em pilares podem ser necessários devido à má qualidade do concreto existente ou à falta de armadura ou, ainda, devido à pilares que mesmo tendo concreto de boa qualidade precisam resistir a cargas superiores às aquelas para as quais foram projetados.

No caso de má qualidade do concreto ou danos sobre a maior parte do pilar, é necessária a remoção de todo o concreto deteriorado, exposição e tratamento das armaduras e estribos caso necessário para só então aplicação de novo concreto.

Nesse caso aconselha-se o aumento de toda a seção do pilar.

No caso de pilares que precisam resistir a maiores esforços que sua capacidade Cánovas (1988) afirma que pode-se resolver o problema mediante aumento de apenas uma das faces do elemento pela aplicação de concreto de adequada resistência, ao qual são adicionadas as armaduras principais e os estribos correspondentes.

2.5 DIMENSIONAMENTO DE ARMADURAS

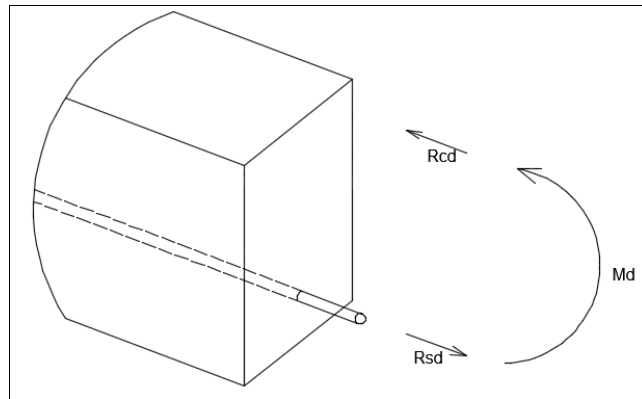
O dimensionamento de armaduras longitudinais e transversais é detalhado pela NBR 6118/2014 e é aqui brevemente comentado para melhor compreensão das dimensões de armaduras apresentadas no capítulo 6 deste trabalho.

2.5.1 Armaduras longitudinais

Armaduras longitudinais destinam-se a resistir a solicitação devida ao momento fletor, isto é, a solicitação que gera na peça um esforço de tração e outro de compressão.

A armadura longitudinal é então posicionada na região tracionada do elemento uma vez que o próprio concreto é capaz de resistir às solicitações de compressão.

Figura 32 - Solicitação devida ao momento fletor em um modelo de viga



Fonte: Produção do próprio autor (sem escala)

onde:

R_{cd} é a resultante de cálculo de compressão no concreto;

R_{sd} é a resultante de cálculo de tração no concreto;

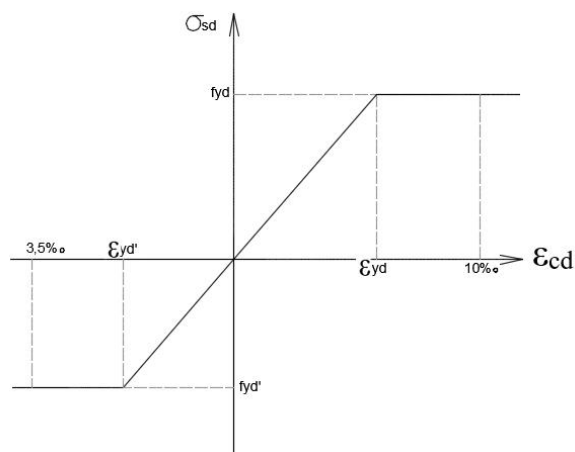
M_d é o momento de cálculo, dado por $M_d = M_k \cdot \gamma_f$ e

γ_f é o coeficiente global das ações.

Deve-se então, para cálculo de armaduras longitudinais utilizar as seguintes considerações:

a) Diagrama tensão x deformação de cálculo do aço ($\sigma_{sd} \times \epsilon_{sd}$):

Figura 33 - Diagrama tensão x deformação de cálculo do aço ($\sigma_{sd} \times \epsilon_{sd}$)



Fonte: produção do próprio autor (sem escala)

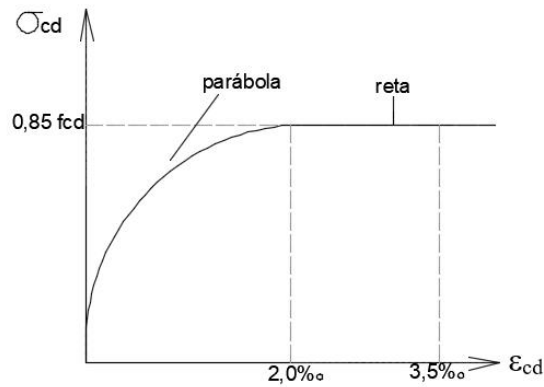
onde:

f_{yd} é a tensão de escoamento de cálculo e

ϵ_{sd} é a deformação de cálculo do aço.

b) Diagrama tensão x deformação de cálculo do concreto:

Figura 34 - Diagrama tensão x deformação de cálculo do concreto

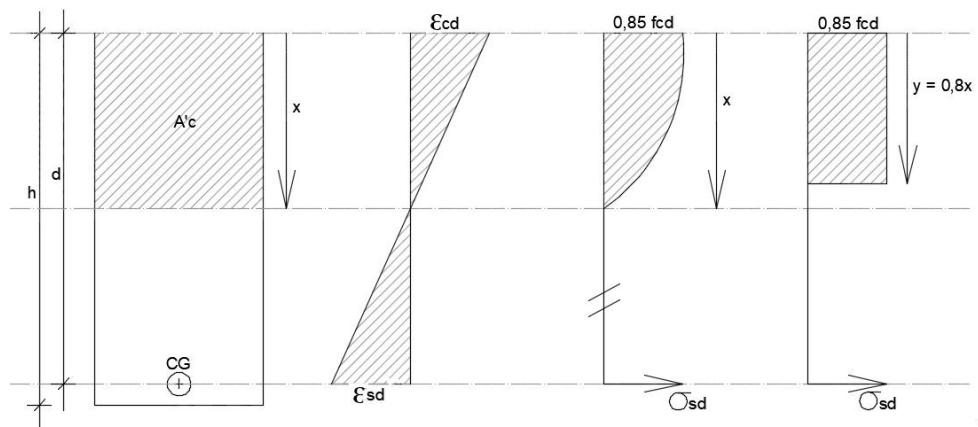


Fonte: Produção do próprio autor (sem escala)

Levando em conta o diagrama acima, tomando-se para cada deformação ϵ_{cd} de uma fibra ao longo da altura, pode-se obter a tensão correspondente introduzindo-se a deformação no diagrama de cálculo do concreto $\sigma_{cd} \times \epsilon_{cd}$, obtendo-se, desta forma, o diagrama de tensões ao longo da altura da seção, como demonstrado no diagrama da figura 34:

c) Diagrama de tensão retangular simplificado:

Figura 35 - (a) Esquema da seção transversal; (b) Diagrama de deformações ao longo da altura da seção; (c) Diagrama de tensão ao longo da altura da seção (diagrama parábola-retângulo); (d) Diagrama de tensão ao longo da altura da seção (diagrama retangular simplificado)



Fonte: Produção do próprio autor (sem escala)

onde:

- A'_c é a área da região comprimida do concreto;
- f_{cd} é a tensão de compressão de cálculo do concreto;
- ε_{sd} é a deformações de cálculo do aço;
- ε_{cd} é a do deformação de cálculo do concreto;
- CG é o centro de gravidade da armadura onde atua R_{sd} ;
- d é a altura útil da seção transversal;
- h é a altura total da seção transversal e
- σ_{sd} é a tensão de cálculo do aço.

Segundo a norma, as seções transversais de concreto podem ser classificadas segundo características de sua armadura, sendo definidas como:

- ✓ *Normalmente armadas* onde o aço está no início do escoamento e o concreto atingiu a deformação de cálculo limite, ou seja, ε_{cd} igual a 3,5 ‰.
- ✓ *Sub-armadas* que são aquelas em que a armadura já passou o escoamento.
- ✓ *Super-armadas* onde o concreto já atingiu a deformação máxima de 3,5 ‰ e o aço ainda não escoou.

Considerando-se que R_{cd} e R_{sd} devem ser de intensidades iguais e sentidos opostos, de modo que o momento fletor seja nulo, pode-se determinar resumidamente o dimensionamento de armaduras longitudinais como segue:

- ✓ Determinação do coeficiente k_c :

$$k_c = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad \text{Eq. (9)}$$

onde

- M_d é o momento fletor de cálculo;
- b_w é a largura da seção transversal retangular;
- d é a altura útil da seção transversal e
- f_{cd} é a tensão resistente de cálculo do concreto.

- ✓ Determinação do coeficiente k_x :

$$k_x = 1,25 - \sqrt{1,5625 - 3,6765 \cdot k_c} \quad \text{Eq. (10)}$$

✓ Determinação do coeficiente k_s :

$$k_s = \frac{1}{1 - 0,4 \cdot k_x} \quad \text{Eq. (11)}$$

✓ Finalmente, pode-se determinar a área da armadura transversal A_s através de:

$$A_s = \frac{k_s \cdot M_d}{d \cdot f_{yd}} \quad \text{Eq. (12)}$$

onde

f_{yd} é a tensão de escoamento de cálculo do aço da armadura

2.5.2 Armaduras transversais

No cálculo para dimensionamento de armaduras transversais, deve-se considerar a verificação do estado limite último, onde deve-se garantir que:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad \text{Eq. (13)}$$

e

$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad \text{Eq. (14)}$$

onde

V_{Sd} é a força solicitante de cálculo;

V_{Rd2} é a força cortante resistente de cálculo;

V_{Rd3} é a força cortante resistente de cálculo relativa à ruína por tração diagonal;

V_c é a parcela da força cortante absorvida por mecanismos complementares ao de treliça e

V_{sw} é a parcela absorvida pela armadura transversal.

O dimensionamento de armaduras transversais, de acordo com a norma, possui dois modelos de cálculo distintos. O modelo I considera diagonais de compressão inclinadas de θ igual a 45° em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural e, ainda, que V_c tem valor

constante, independentemente de V_{sd} . O segundo modelo admite qualquer inclinação $30^\circ < \theta < 45^\circ$ em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural e, ainda, que V_c reduz com aumento de V_{sd} . A seguir, é apresentada a sequência de cálculos para dimensionamento de armadura transversal apenas pelo modelo I, uma vez que o objetivo deste tópico é simplesmente elucidar a ideia do procedimento de cálculo para determinação de área dos estribos:

a) Verificação da compressão diagonal do concreto:

$$V_{Rd2} = 0,27 \alpha_v f_{cd} b_w d , \quad \text{Eq. (15)}$$

Com o coeficiente dado por

$$\alpha_v = 1 - \frac{f_{ck}}{250} . \quad (f_{ck} \text{ em MPa}) \quad \text{Eq. (16)}$$

b) Cálculo da armadura transversal:

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) 0,9 d f_{ywd} (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad \text{Eq. (17)}$$

Sendo $V_c = V_{c0}$ na flexão simples e na flexo-tração com a linha neutra cortando a seção com V_{c0} e f_{ctd} dados por:

$$V_{c0} = 0,6 f_{ctd} b_w d . \quad \text{Eq. (18)}$$

e

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad \text{Eq. (19)}$$

onde

b_w é a menor largura da seção;

d é a altura útil da seção;

s é o espaçamento entre elementos da armadura transversal A_{sw} ;

f_{ywd} é a tensão na armadura transversal passiva e

α é o ângulo de inclinação da armadura transversal.

3 ESTUDO DE CASO – APRESENTAÇÃO

A obra analisada como foco deste trabalho encontra-se em cidade litorânea sendo que até o momento da vistoria já haviam sido construídos dois pavimentos de um total de cinco propostos.

A fotografia 1 abaixo mostra as condições da edificação no momento da vistoria.

Fotografia 1 - Edifício em seu estado original



Fonte: R. Sartori Engenharia (2015)

O projeto dessa edificação prevê, portanto, a construção de mais três pavimentos sendo o térreo reservado para garagem e os demais destinados aos pequenos apartamentos cujas plantas podem ser observadas nos anexos deste trabalho

Inicialmente foi realizada uma vistoria do estado da construção para então definir as correções necessárias para as patologias apresentadas.

O fato da obra ter ficado durante um período razoável de tempo parada, ou seja, sem conclusão, aliado às condições de agressividade ambiental oferecidas por região litorânea

contribuíram para a apresentação de patologias em estado avançado, cujas manifestações patológicas identificadas são descritas a seguir.

4 MAPEAMENTO DE PATOLOGIAS

4.1 PATOLOGIAS GERADAS NA ETAPA DE PROJETO

Ao visitar o local do edifício pôde-se constatar que a maior parte das patologias que a estrutura apresentava era decorrente de falhas na etapa da execução.

Apesar disso, foi observada uma patologia que pode ter sido causada tanto por falha de projeto como falha de execução.

A fotografia 2 abaixo demonstra a colocação de tubos de PVC atravessando uma viga:

Fotografia 2 - Tubos de PVC atravessando viga



Fonte: R. Sartori Engenharia (2015)

Fotografia 3 - Tubos de PVC atravessando viga - vista frontal



Fonte: R. Sartori Engenharia (2015)

Tal falha pode ter ocorrido tanto por falta de previsão do projetista quanto à posição dos encanamentos necessários ao ser levantada a estrutura, caracterizando falha de projeto, quanto imperícia do mestre de obras ao realizar a leitura da planta, tornando o erro numa falha de execução.

Patologias desse tipo causam grande risco à obra como um todo visto que ao perfurar um elemento estrutural dessa forma não é mais possível garantir que esse elemento resista às solicitações a que está submetido, comprometendo toda a sua estabilidade.

4.2 PATOLOGIAS GERADAS NA ETAPA DE EXECUÇÃO

A Fotografia 4 evidencia a corrosão nas armaduras dos pilares devido a exposição do aço ao ambiente que caracteriza erro de execução decorrente de pouco cobrimento na fôrma ou mau lançamento do concreto deixando vazios no pilar.

Além disso, devido à região ser litorânea é possível assumir que a agressividade do meio acelerou a oxidação da armadura, como pode ser visto na Fotografia 4:

Fotografia 4 - Corrosão de armadura do pilar



Fonte: R. Sartori Engenharia (2015)

Foi possível detectar vários pilares com o mesmo problema. A oxidação das armaduras causa também fissuras e posterior deslocamento de concreto devido ao processo de expansão de volume gerado pela reação química.

Vários pontos sofriam do mesmo problema um exemplo é mostrado na fotografia 5:

Fotografia 5 - Fissura gerada por expansão volumétrica



Fonte: R. Sartori Engenharia (2015)

Além disso, a infiltração da água causou também a proliferação de musgos pela estrutura, como pode ser observado nas fotografias 6 e 7:

Fotografia 6 - Musgo no chão da estrutura



Fonte: R. Sartori Engenharia (2015)

Fotografia 7 - Musgo na laje da varanda



Fonte: R. Sartori Engenharia (2015)

Notou-se em alguns pilares também o efeito da carbonatação, que segundo Ferreira (2005), atua pela associação do CO_2 presente na atmosfera com a umidade sobre a superfície do concreto.

A sinergia entre esses elementos provoca uma redução do pH do concreto que em condições normais varia entre 12,5 e 13,0. Essa reação é evidenciada pelo escurecimento da superfície do concreto como pode ser visto na Fotografia 8. Tal ocorrência favorece significativamente a corrosão do aço, que só é passivo para $\text{pH} > 10,5$.

Fotografia 8 - Escurecimento de superfície de concreto devido a carbonatação



Fonte: R. Sartori Engenharia (2015)

Numa escavação de inspeção de quão profunda era a exposição da armadura de um pilar, constatou-se que um dos pilares do edifício foi construído sem o apoio de uma sapata, caracterizando a mais crítica falha de execução encontrada nessa obra.

As fotografias a seguir demonstram o estado em que o pilar foi encontrado durante a escavação:

Fotografia 9 - Escavação da base do pilar sem fundação



Fonte: R. Sartori Engenharia (2015)

Fotografia 10 - Pilar sem apoio



Fonte: R. Sartori Engenharia (2015)

O modo como o pilar foi encontrado demonstra que não havia elemento de apoio que recebesse a carga da coluna e a distribuísse adequadamente ao solo, tornando a estrutura suscetível a recalques diferenciados, o que poderia ser desastroso se a estrutura entrasse em colapso enquanto estivesse em plena utilização.

5 PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO

5.1 REDISTRIBUIÇÃO DOS TUBOS DE PVC

Em termos de reparo de furos para passagem de tubos de PVC em vigas a solução é bastante simples uma vez que fique claro que a furação não tenha prejudicado aspectos estruturais do elemento.

Nesse caso, Helene (1992) afirma que a medida mais rápida e de boa eficiência é o preenchimento do furo com graute de cimento que dispensa adensamento e geralmente possui alta resistência inicial e final em comparação com a do concreto já existente na estrutura, para compensar a falta de armadura na cavidade. O graute é uma boa opção para esse tipo de restauro também por apresentar boa proteção contra corrosão visto que possui alta impermeabilidade.

5.2 LIMPEZA DE SUBSTRATOS

No intuito de restaurar elementos avariados da obra faz-se necessário primeiramente a limpeza do substrato para que possa receber posteriormente o tratamento adequado.

Nesse aspecto, para o caso das regiões da estrutura que apresentavam proliferação de musgos devido a infiltração de água, uma simples lavagem com jatos de água sob pressão é suficiente para remoção eficaz dos mesmos. Souza e Ripper (1998, p. 110) recomendam que os trabalhos de lavagem devam ser feitos no sentido descensional e em movimentos circulares, com o cuidado de realizar uma correta manutenção no compressor para manter sua pressão constante. É aconselhável também que posteriormente seja passado algum produto impermeabilizante nessas regiões, para impedir reaparecimento dessa patologia.

Fotografia 11 - Limpeza do concreto



Fonte: R. Sartori Engenharia (2015)

Para o caso dos elementos estruturais que sofreram corrosão de armadura bem como das regiões onde foram encontradas fissuras pelo mesmo motivo de oxidação, a limpeza começa pela total exposição do aço degradado por meio de corte com martelo demolidor, como pode ser visto na Fotografia 12:

Fotografia 12 - Corte de concreto para exposição de armadura corroída



Fonte: R. Sartori Engenharia (2015)

Removido todo o concreto para exposição do aço oxidado, o passo seguinte mais comum, segundo o autor, é a lavagem da região, que pode ser feita com jatos mistos de areia e água sob pressão.

As vantagens desse método de limpeza são a total remoção de partículas soltas ou graxas e óleos que possam interferir na futura aderência da camada protetora, além da limpeza da armadura através da retirada das camadas corroídas sobre ela.

5.3 TRATAMENTO DE AÇO

Uma vez realizada a limpeza completa da região corroída do aço é importante verificar a necessidade de substituição ou reforço de armadura em pontos onde fica perceptível seu excessivo desgaste.

Sendo esse o caso, recomenda-se fazer a avaliação da seção que deve ser ancorada no concreto para só depois proteger a armadura.

A proteção da armadura mais utilizada é a aplicação de primers que contém alta concentração de zinco em sua composição para que na ocorrência de novo contato com o agente oxidante, o zinco atue como ânodo de sacrifício, já que é mais eletronegativo que o aço.

A esse fenômeno dá-se o nome de proteção galvânica. O produto deve cobrir toda a superfície do aço garantindo máxima vedação do mesmo.

A Fotografia 13 mostra a cobertura com protetor galvânico:

Fotografia 13 - Aplicação de proteção nas armaduras



Fonte: R. Sartori Engenharia (2015)

Somente após a completa secagem da proteção galvânica é possível preencher todos os cortes executados. Tais preenchimentos servem para reconstrução da seção do pilar/viga.

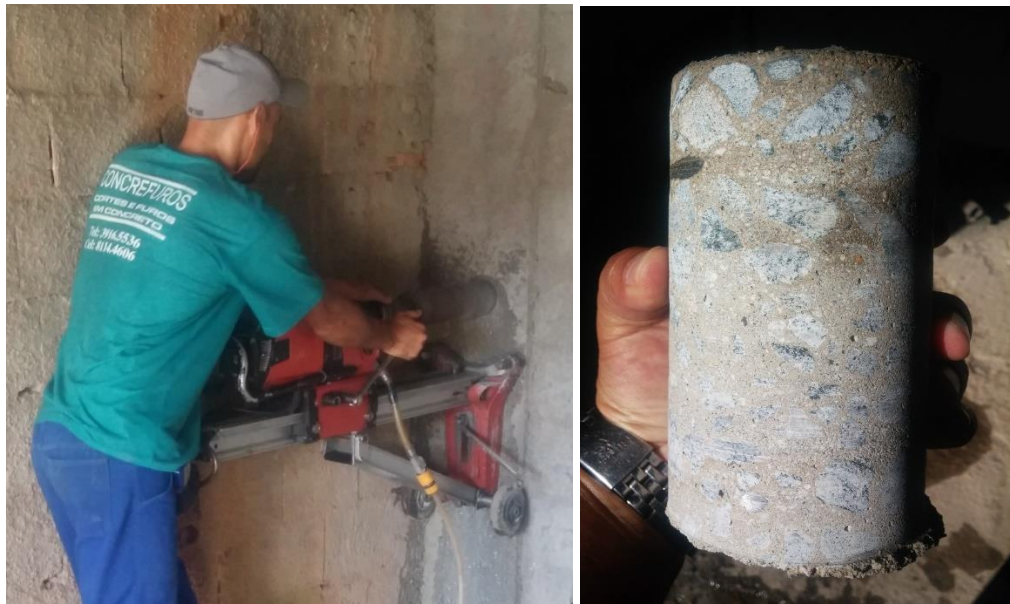
5.4 EXTRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA

Pode-se dizer que o problema mais crítico encontrado nessa obra foi a falta de elemento de fundação que recebesse as solicitações do pilar.

Para esse tipo de ocorrência e visando a intenção do proprietário de aumentar a quantidade de andares do edifício, foi necessário verificar a resistência do concreto em vários pontos da estrutura por meio de ensaios de compressão axial de corpos de prova, segundo rege a NBR 7680-1/2015.

As fotografias 14 (a) e (b) mostram exemplos da retirada dos corpos de prova e do corpo de prova propriamente dito.

Fotografia 14 - (a): Retirada de corpos de prova; (b) Corpo de prova retirado



Fonte: R. Sartori Engenharia (2015)

Após a verificação da resistência já mencionada, pôde-se planejar um projeto de um reforço para a estrutura, além da colocação de uma sapata para o pilar que não possuía fundação.

Detalhes do projeto podem ser conferidos adiante.

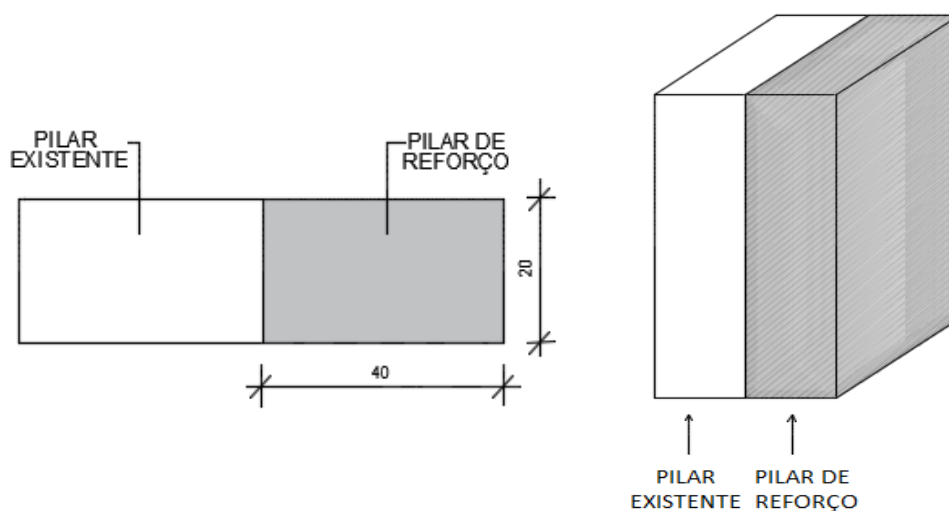
6 PROJETO DE REFORÇO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Como supracitado, o edifício escolhido para o estudo de caso encontrava-se em primeira visita com dois pavimentos, o térreo e o primeiro andar. A estrutura que sustentaria o segundo pavimento (pilares e alvenaria) já estava construída, mas não possuía laje até então. Tendo em vista o objetivo de levantarem-se mais 3 pavimentos e, considerando o fato de a estrutura encontrada apresentar diversas patologias, desde fáceis até um pouco mais complexas de serem reparadas, optou-se pela criação de um projeto de reforço para os pilares do pavimento térreo, de forma a garantir a resistência adequada dos mesmos à nova solicitação de cargas impostas.

Convencionou-se acrescentar um pilar de reforço faceando a menor dimensão seção transversal dos pilares já existentes, de modo que a estrutura de reforço tivesse 20 cm x 40 cm, ou seja, a mesma dimensão do pilar existente acomodado ao lado do mesmo.

A disposição esquemática pode ser vista na figura 35:

Figura 36 - Detalhe típico do pilar de reforço (cm)



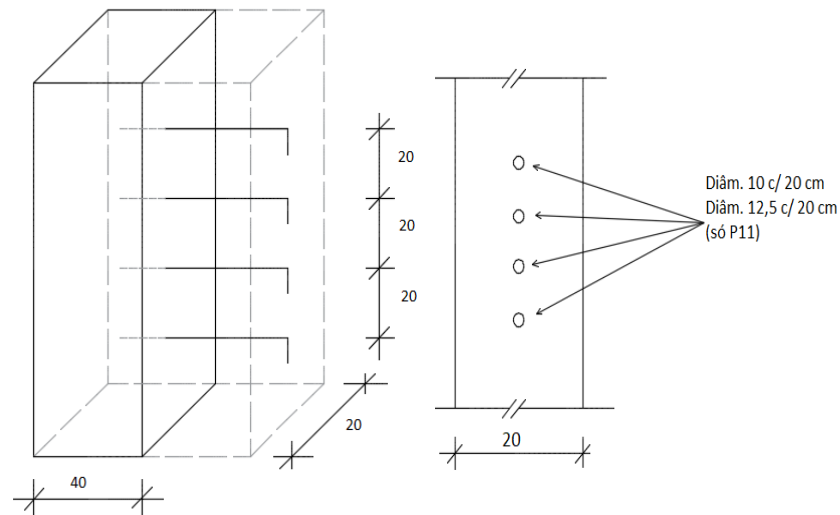
Fonte: Produção do próprio autor (sem escala)

A solidarização entre os pilares pôde ser realizada inserindo no pilar existente armaduras de 45 cm com diâmetro de 10 mm arranjadas com espaçamento de 20 cm entre elas ao longo de todo comprimento do pilar e na seção de encontro entre o pilar e a laje. O pilar 11, destacado no Apêndice B deste trabalho, é o único com armadura de diâmetro 12,5 mm por ter apresentado necessidade de reforço mais expressivo. A inserção das armaduras

pode ser feita com resina epóxi e colocada a 10 cm de profundidade no pilar existente, deixando 25 cm de aço para ficar no pilar de reforço, com gancho de 10 cm.

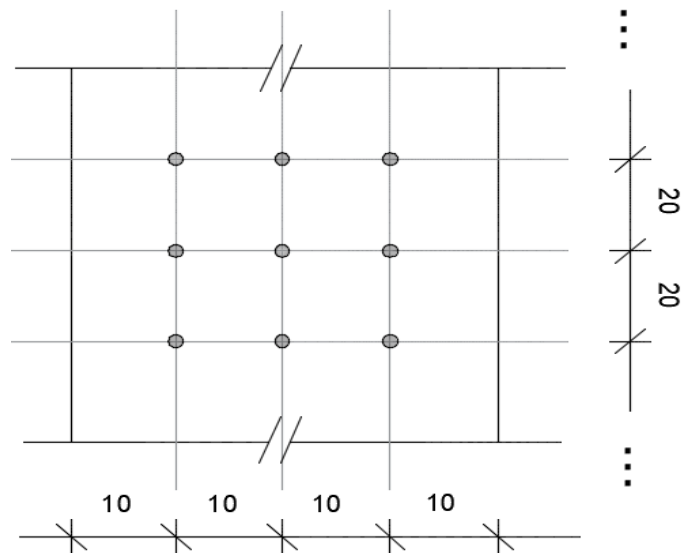
O resultado é um pilar com armaduras dispostas como no esquema da figura 36.

Figura 37 - Detalhamento de armaduras (cm)



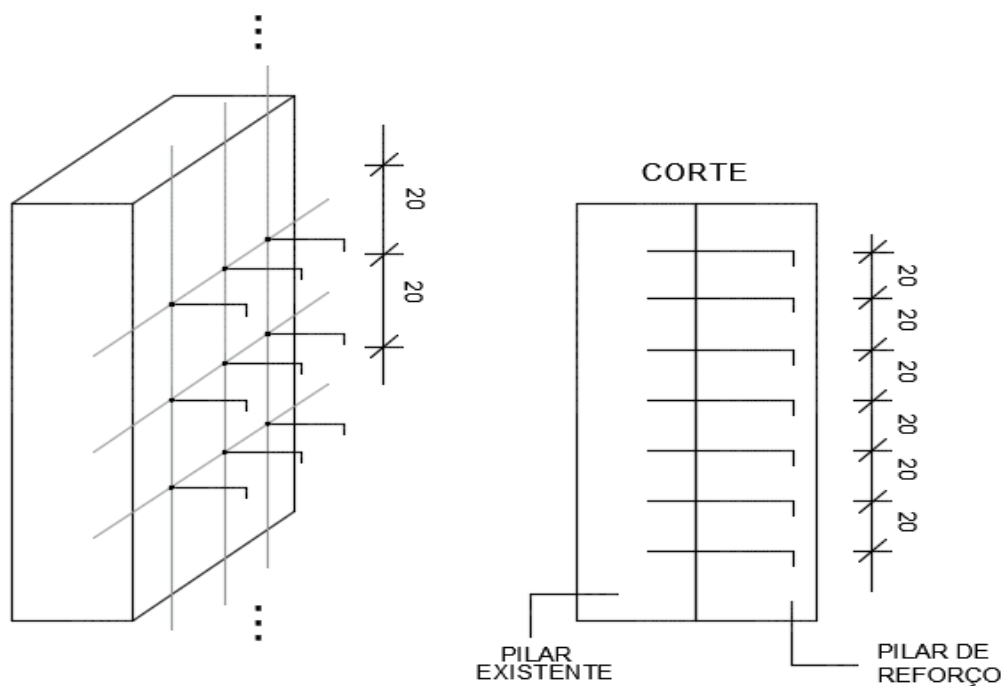
Fonte: Produção do próprio autor (sem escala)

Figura 38 - Vista frontal dos chumbadores do pilar existente (cm)



Fonte: Produção do próprio autor (sem escala)

Figura 39 - Detalhamento construtivo dos chumbadores no pilar existente (cm)

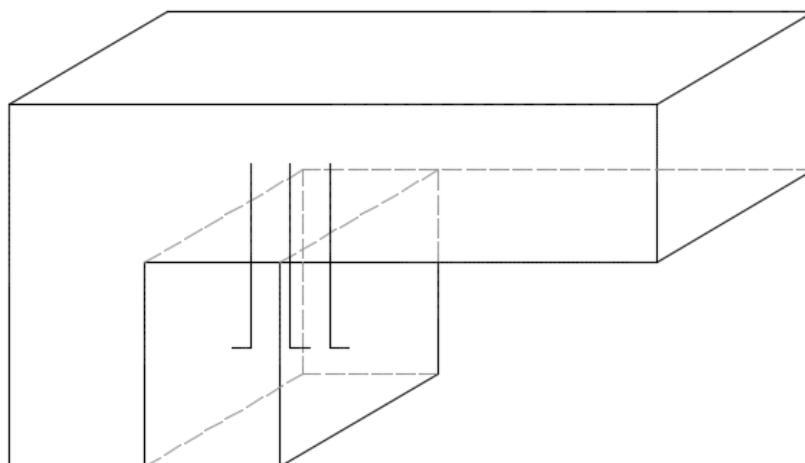


Fonte: Produção do próprio autor (sem escala)

No contato do novo pilar com a viga superior dimensiona-se para introduzir 3 armaduras de 50 cm com $\phi = 10$ mm ($\phi = 12,5$ mm para o pilar 11) para efeitos de vinculação, sendo 10 cm de seu comprimento inseridos na face inferior da viga, 30 cm ao longo do pilar de reforço e 10 cm de gancho.

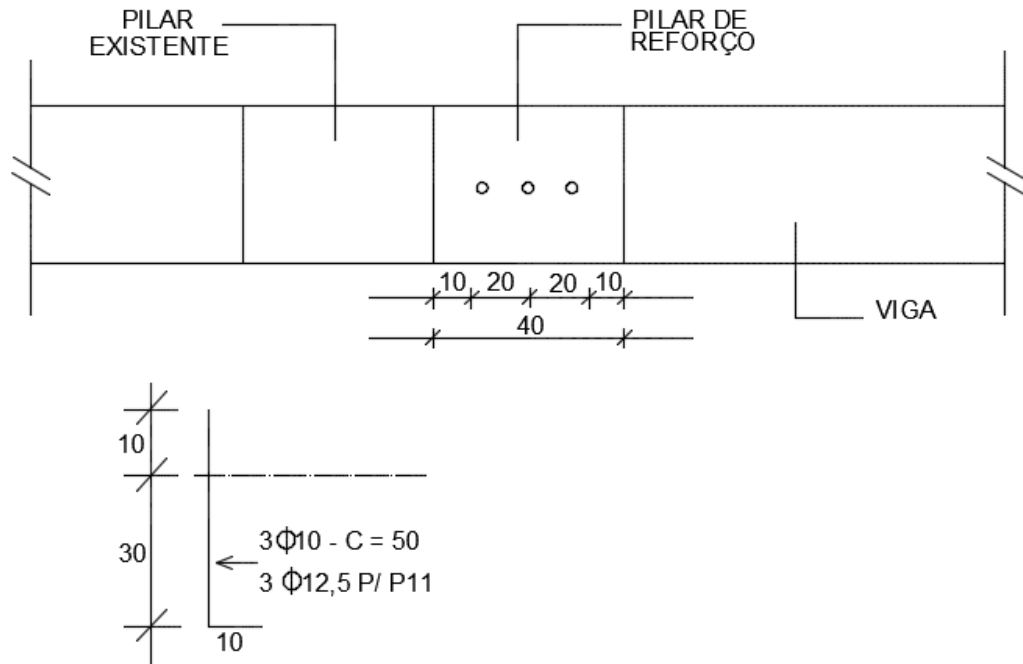
Cada barra deve estar distanciada de 20 cm em relação a outra, sendo que as da extremidade ficaram a 10 cm da face de menor dimensão da seção do pilar como ilustrado abaixo:

Figura 40 - Perspectiva do chumbamento do topo do pilar com viga superior



Fonte: Produção do próprio autor (sem escala)

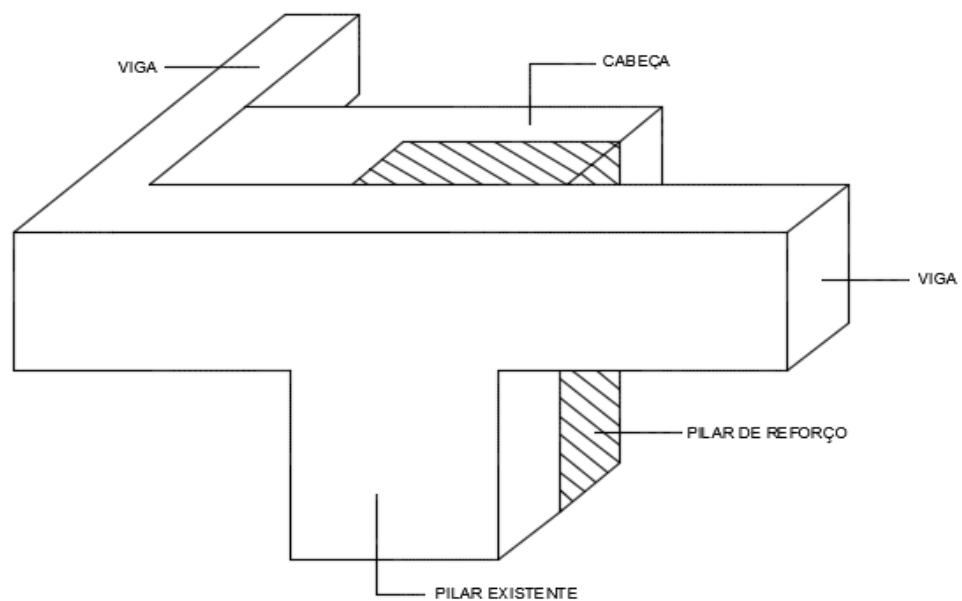
Figura 41 - Detalhamento dos chumbadores da viga superior (cm)



Fonte: produção do próprio autor (sem escala)

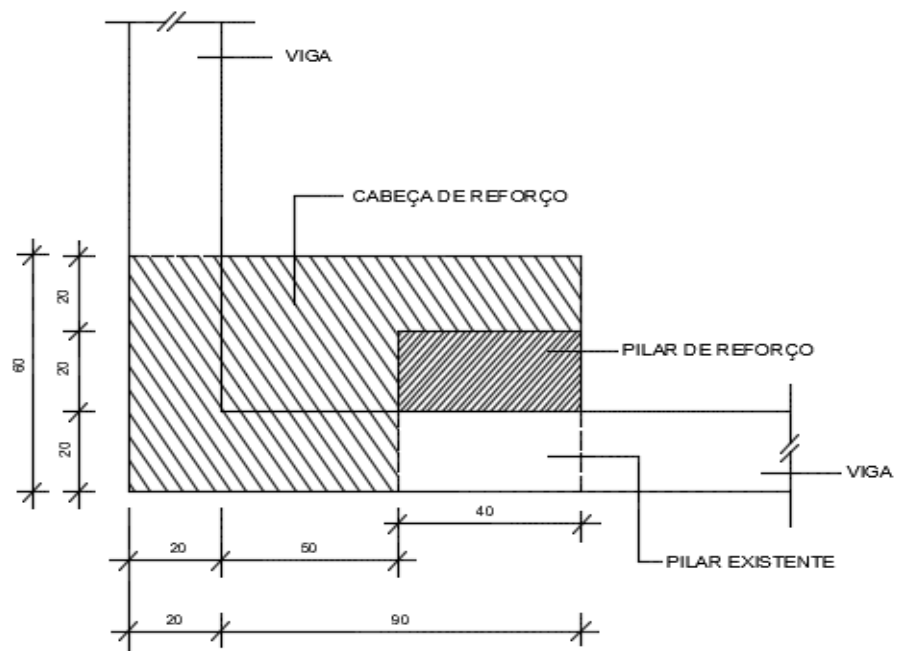
Foi projetada, para melhores efeitos de vinculação do pilar à viga superior, uma cabeça de reforço com características de acordo com o esquematizado abaixo:

Figura 42 - Cabeça de reforço



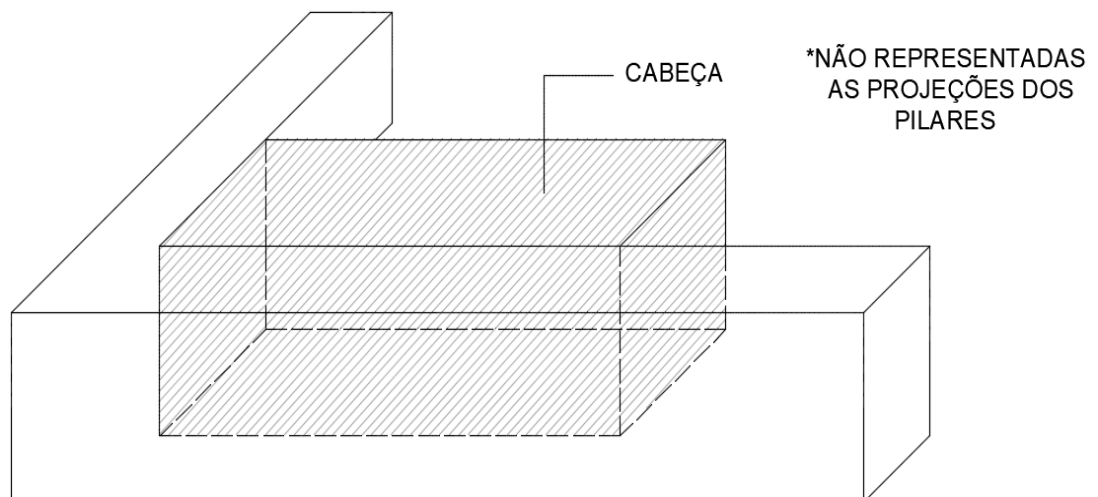
Fonte: Produção do próprio autor (sem escala)

Figura 43 - Detalhamento da cabeça de reforço (cm)



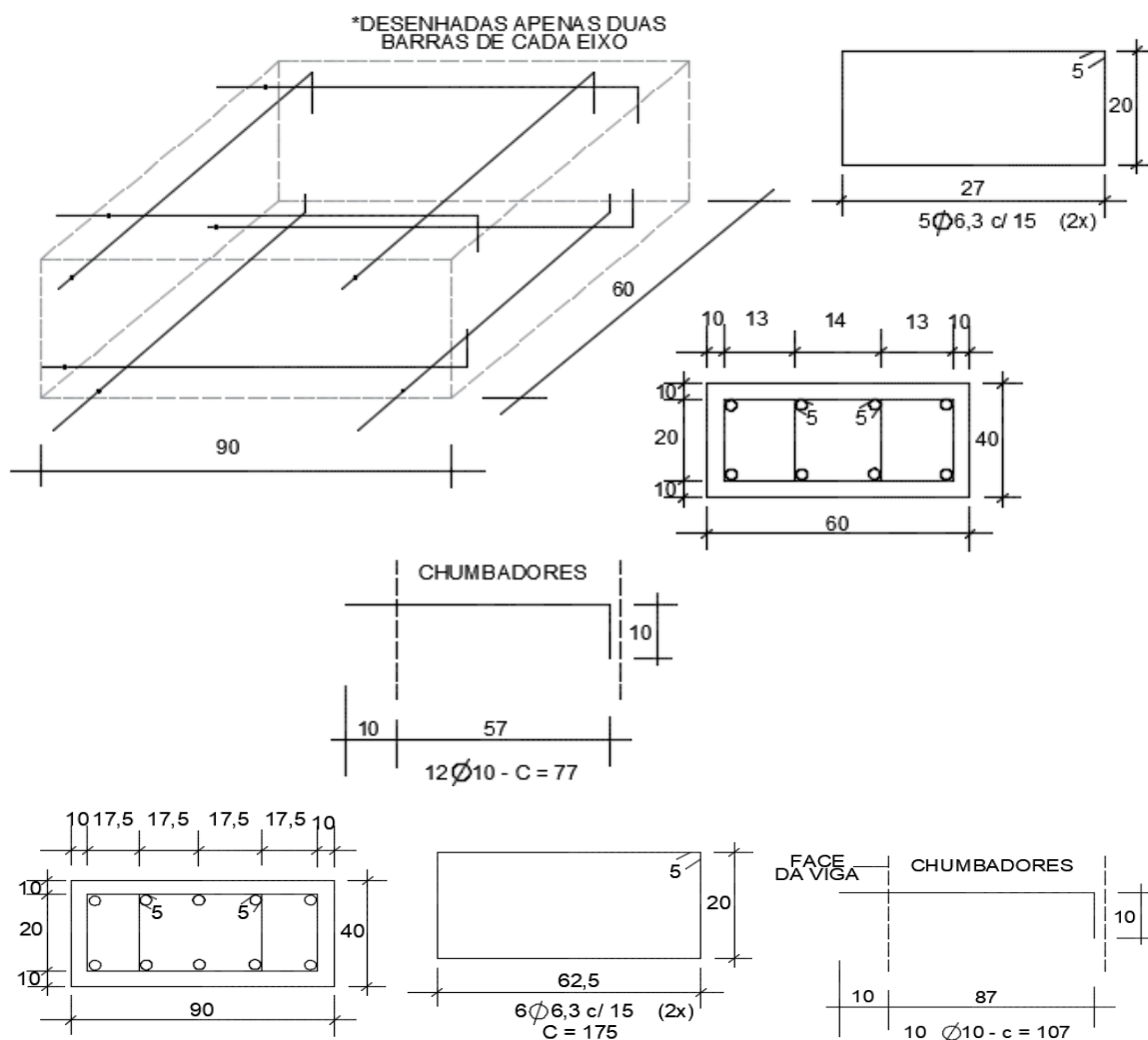
Fonte: Produção do próprio autor (sem escala)

Figura 44 - Gaiola da cabeça de reforço



Fonte: Produção do próprio autor (sem escala)

Figura 45 - Detalhamento da gaiola da cabeça de reforço (cm).



Fonte: Produção do próprio autor (sem escala)

Da mesma forma, é necessário colocar armaduras que conectem o pilar de reforço à viga de equilíbrio, chamadas chumbadores, com 57 cm de comprimento, 10 cm no pilar, 40 cm na viga com 7 cm de gancho, além estarem distribuídos a 5 cm de distância entre si.

A ligação entre a viga de equilíbrio com a sapata também é possível pela colocação de chumbadores de $\phi = 10$ mm, com comprimento variável em função da altura da sapata, mas com especificação mínima de 10 cm para dentro da sapata, bem como gancho de 10 cm e mínimo de 15 cm para o comprimento dentro da viga, além de cobrimento de 5 cm. A viga de equilíbrio, por sua vez, foi projetada para receber 6 barras de 10 mm, além de estribos de $\phi = 6,3$ mm a cada 15 cm de seu comprimento:

Figura 46 - Detalhamento da viga de equilíbrio entre o pilar e à sapata (cm).

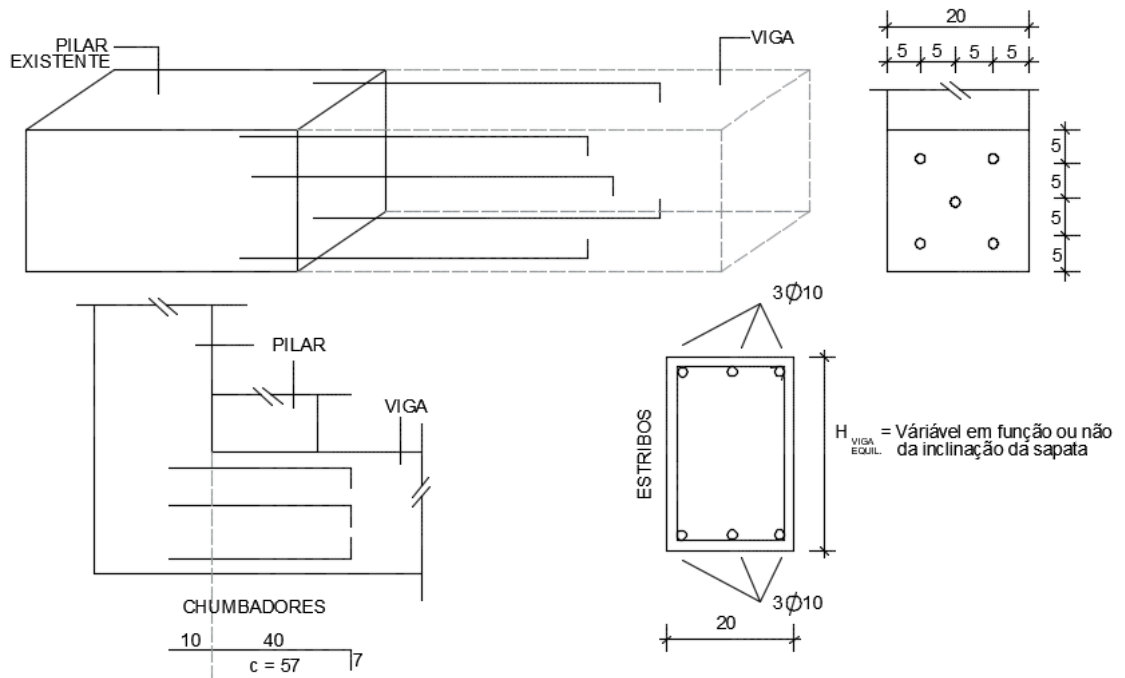
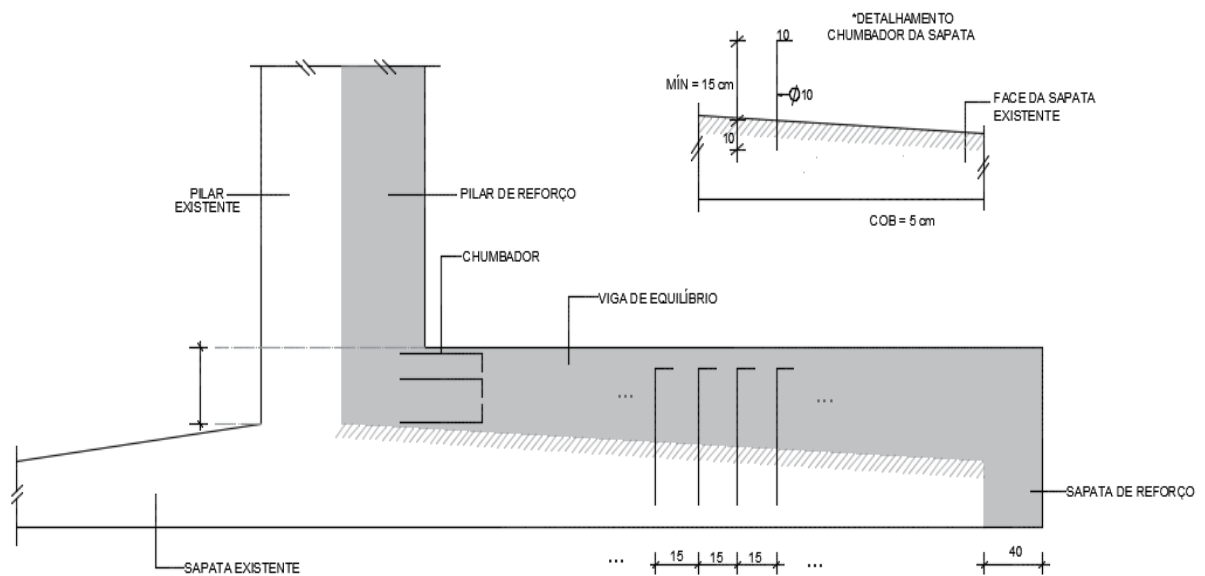
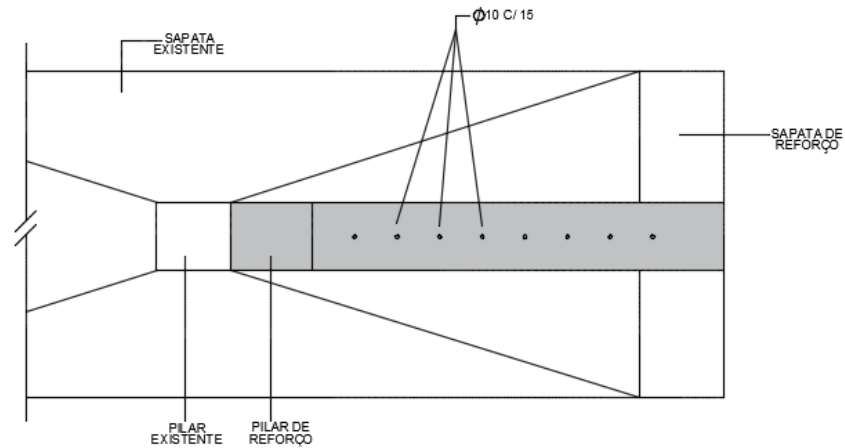


Figura 47 - Vista em corte da viga de equilíbrio e a sapata (cm)



A viga de equilíbrio conecta-se à sapata já existente e também a uma sapata de reforço, de modo que a ligação entre os dois elementos seja melhor estabelecida. Tal sapata pode ser solidarizada à outra com adesivo epóxi, como detalhado conforme a figura 48:

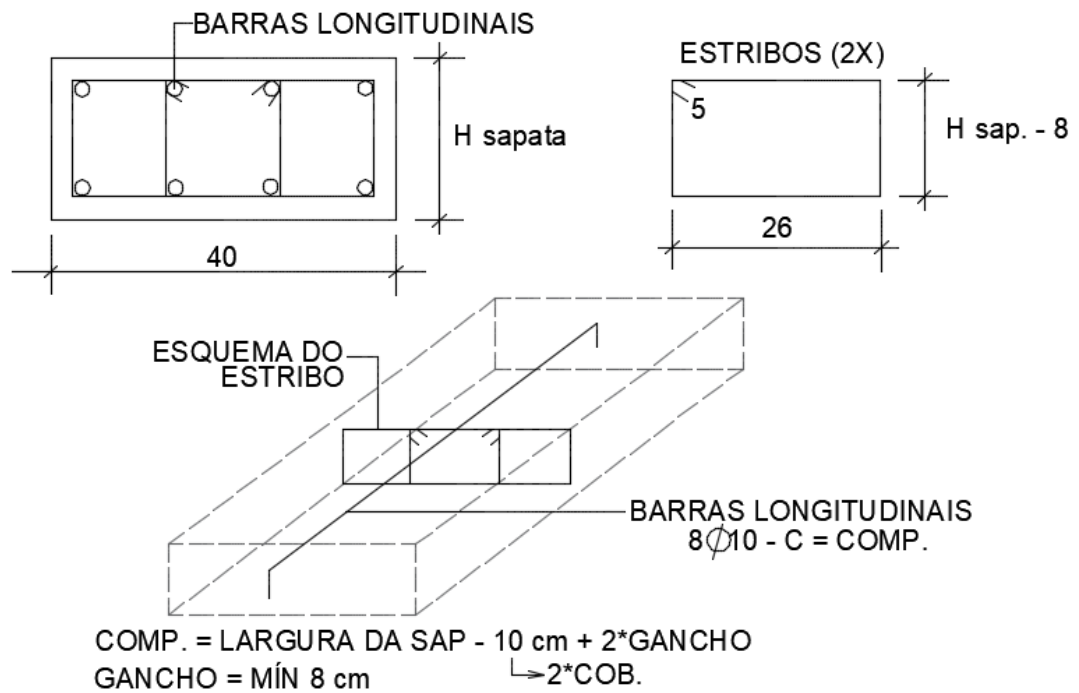
Figura 48 - Vista em planta da ligação entre viga de equilíbrio e sapata de reforço (cm)



Fonte: Produção do próprio autor (sem escala)

A armadura da sapata é composta por 8 barras de $\phi = 10$ mm, com 2 estribos para cada seção do comprimento da sapata, como pode ser verificado conforme a figura 48:

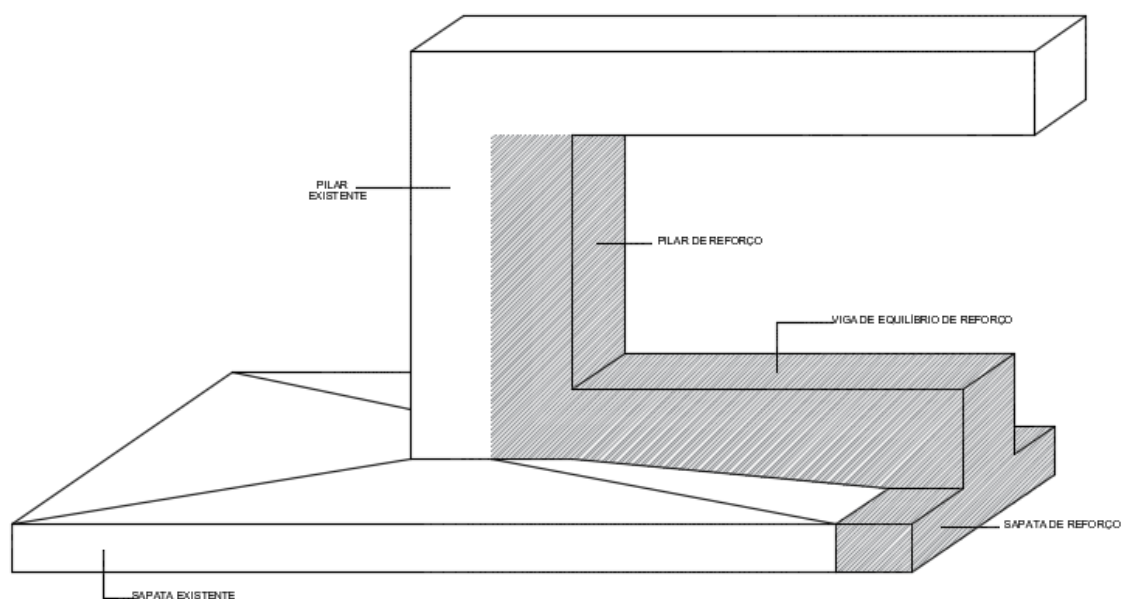
Figura 49 - Armadura da sapata (cm)



Fonte: Produção do próprio autor (cm)

O elemento de reforço final deve ficar como conforme a figura 50:

Figura 50 - Perspectiva dos elementos de reforço



Fonte: Produção do próprio autor (sem escala)

Aliado ao projeto de reforço nos pilares do pavimento térreo é necessária em um desses pilares a confecção de uma sapata, visto que um deles foi encontrado sem fundação, como exposto no tópico 4.2 deste trabalho.

Após um simples dimensionamento da sapata, pode-se executá-la junto com as obras de reforço.

7 CONCLUSÃO

A necessidade do estudo de patologias em estruturas de construção civil evidencia a ainda grande incidência de problemas oriundos da má elaboração de projetos, da má execução e má utilização das construções.

Entender o mecanismo que provoca o problema é fundamental para a concepção do método corretivo adequado à situação encontrada.

O edifício do estudo de caso permitiu a melhor assimilação dos conceitos reunidos em revisão bibliográfica, visto que foi possível identificar, por meio de inspeção visual e mapeamento fotográfico, patologias comuns às construções expostas à umidade e ao ambiente agressivo típico de região litorânea.

A coleta de informações acerca desse tema permitiu ainda a sugestão de intervenções julgadas necessárias à recuperação da estrutura para que esta readquirisse desempenho esperado em projeto.

A escolha das intervenções propostas procurou levar em consideração a disponibilidade de materiais, equipamentos e especialização da mão-de-obra local, de forma que as soluções adotadas representassem um custo-benefício aceitável.

Além das propostas de intervenções de caráter reparatório da estrutura, este trabalho procurou também propor a intervenção por meio de projeto de reforço de pilares, que precisavam suportar carga extra devido a inclusão de novos pavimentos ao edifício. O projeto de reforço baseou-se no aumento de seção dos pilares já existentes, de forma que a conformação final deles atendesse as solicitações sem alterar significativamente seu aspecto.

Destacou-se também ao longo deste trabalho a necessidade da confecção de uma sapata para um dos pilares que foi encontrado sem fundação, devido ao fato dessa patologia de execução ser inaceitável do ponto de vista de segurança estrutural, além de evidenciar a falta de atenção dos operários que executaram essa etapa da construção.

Erros absurdos como esse evidenciam a necessidade de fiscalização adequada da obra, de modo a impedir sua ocorrência, visto que os problemas encontrados nesse estudo de caso apontam principalmente para a falha humana na execução do projeto. Além disso, a fiscalização adequada e conscientização dos operários frente a importância do correto emprego dos materiais e métodos de execução são fundamentais para garantir uma melhor qualidade no serviço prestado.

Procurou-se apresentar aqui apenas algumas das patologias comuns às obras de concreto armado, mas sabe-se que devido a fatores como limitação financeira, mão-de-obra não especializada, falta de fiscalização etc., existem inúmeras outras patologias que ocorrem nas etapas da edificação. Sendo assim, as informações reunidas nesta obra podem servir como referência aos interessados no assunto, bem como servirem de base para uma pesquisa aprofundada sobre o tema de patologias em construções no Brasil, visto que o país em geral ainda não possui dados concretos e atualizados para percepção do quanto os problemas em construções afetam os custos tanto para obras residenciais, como para obras públicas. No caso desta última, compreender melhor quanto se perde quando não se previne, planeja e executa de forma adequada uma obra é fundamental para a economia de recursos que possam ser utilizados em outras áreas de gestão pública.

O presente trabalho, portanto, viabilizou por meio do estudo de caso realizado e da bibliografia levantada um conhecimento mais palpável do conceito de patologia em estruturas de concreto armado, como elas ocorrem, porque ocorrem e quando ocorrem. Proporcionou a compreensão de que muitas vezes uma patologia pode surgir por diversos fatores associados, além de não existir uma única solução para correção da mesma. Possibilitou a ciência de que os problemas que uma obra pode apresentar e das causas que os originam são ferramentas essenciais para a formação do engenheiro civil, no sentido de despertar nele uma maior preocupação com a qualidade da execução de todas as etapas do empreendimento pelo qual está responsável, além de permiti-lo reconhecer focos de cuidado especial para prevenção de patologias ou ainda adotar as melhores medidas de reparo ou reforço necessárias caso a manifestação patológica seja identificada. Pelo fato das obras de reforma serem recorrentes ao longo da carreira de um engenheiro civil, o presente trabalho contribuiu de forma significativa para um aperfeiçoamento acadêmico, de modo que pode-se estar melhor preparado para desenvolver projetos de reparo e reforço na vida profissional.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: edificações habitacionais: desempenho: parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-1**: extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto: parte 1: resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 2015.
- ARIVABENE, A. C. Patologias em estruturas de concreto armado estudo de caso. **Revista Online IPOG Especialize**, v. 1, p. 1-22, 2015.
- BERTOLINI, L. **Materiais de construção**: patologia, reabilitação, prevenção. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- BICZÓK, I. **La corrosión del hormigón y su protección**. 6. ed. Bilbao: Editora Urmo, 1978.
- BUZON, E. **Código de Hamurabi**. 2. ed. Petrópolis: Editora Vozes, 1976.
- CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: PINI, 1988.
- DAL MOLIN, D. C. C. **Análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. 1988. xx f. Tese (Doutorado em ...) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.
- DHIR, R. K.; JONES, M. R.; AHMED, H. E. H. Concrete durability: estimation of chloride concentration during design life. **Magazine of Concrete Research**, v. 43, n. 154, p. 37-44, 1991.
- FERREIRA, B. **Patologias e recuperação de estruturas de concreto armado**. Notas de aula. Guaratinguetá, 2005.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC: Livros técnicos e científicos editora S.A., 1996.
- HELENE, P. **Estrutura interna do concreto**. São Paulo: PINI, 1980.
- HELENE, P. **Corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo: PINI: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986.
- HELENE, P. **Manual para reparo, reforço e recuperação de estruturas de concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1992.
- IBRACON, I. B. DE C. **Concreto e construções**. São Paulo. Editora IBRACON, 2008. 88 p.
- KAEFER, L. F. **A evolução do concreto armado**. Apostila da disciplina PEF5707. São

Paulo, 1998.

LICHTENSTEIN, N. B. **Patologia das construções**: procedimento para diagnóstico e recuperação. v. 7, p. 35, 1986.

MACHADO, A. DE P. Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono. p. 271, 2002.

MARCELLI, M. **Sinistros na construção civil**: causa de soluções para danos e prejuízos em obras. São Paulo: PINI, 2007.

MARQUES DE JESUS, C. R. **Análise de custos para reabilitação de edifícios para habitação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2008.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto & Construções**, v. 37, n. 53, p. 14-19, 2009.

POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado**: causas, mecanismos, prevenção e recuperação. Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

RIPPER, THOMAZ; SOUZA, V. C. M. DE. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

R. SARTORI ENGENHARIA. **Arquivo fotográfico**, 2015.

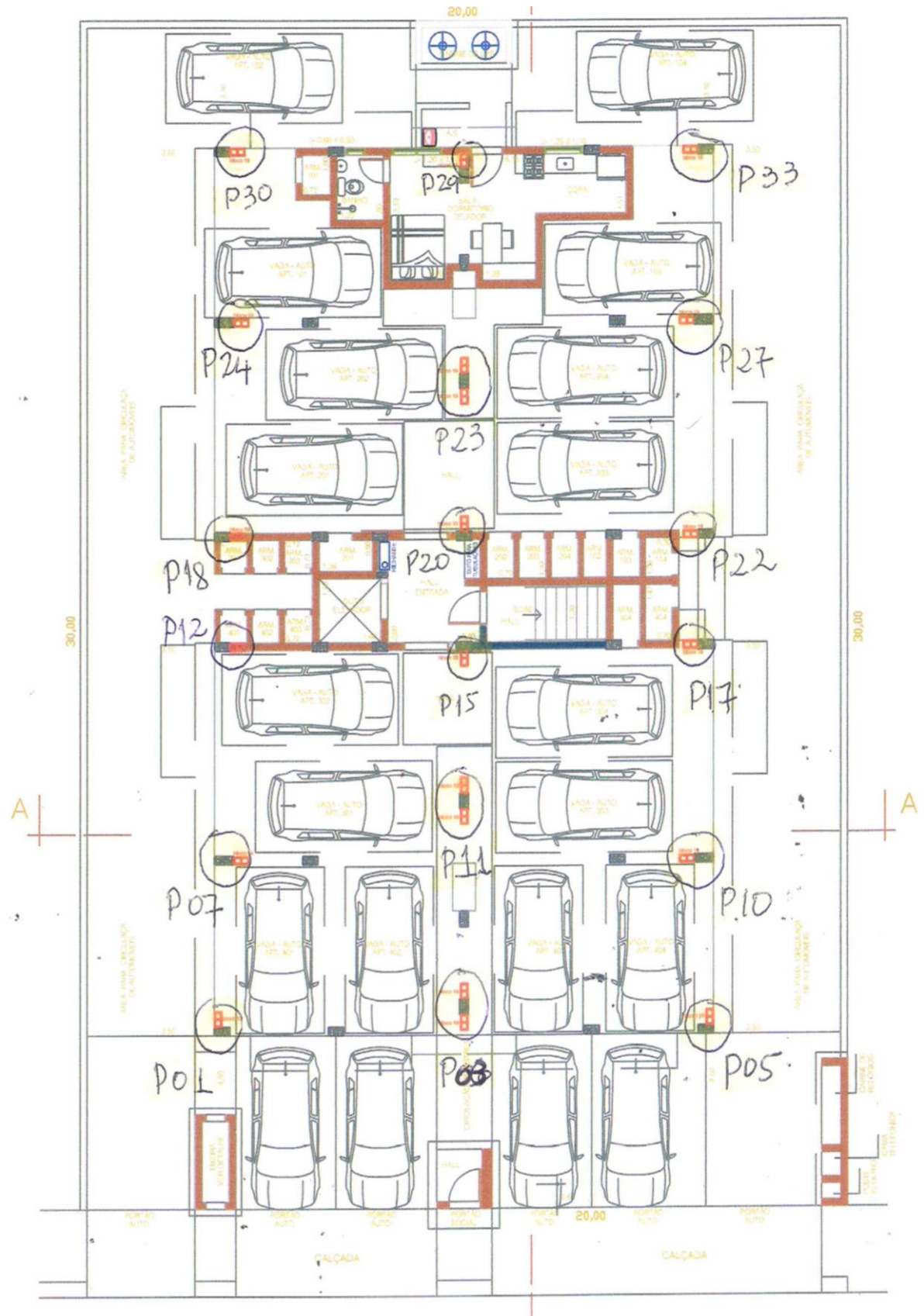
THOMAZ, E. **Trincas em edifícios**: causas, prevenção e recuperação. São Paulo: PINI, 1989. v. 1.

VAYSBURB, A. M. . E.; H., P. How to make today's repairs durable for tomorrow: corrosion protection in concrete repair. **Construction and Building Materials**, v. 14, n. 4, p. 189–197, 2000.

SEGS - SISTEMA DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO SINDICAL. **Custos com reformas**. Disponível em: <<http://www.segs.com.br/economia/940-em-2015-gastos-com-reformasconstrucoes-e-pequenos-reparos-manutencao-domestica-chegou-a-r-83-004-914-676-76.html>>. Acesso em: 20 out. 2017.

MEGADESETEC. **Fissurômetro**. Disponível em: <<https://www.megadestec.com.br/fissurometro-fiss-04-trident>> Acesso em: 20 out. 2017.

APÊNDICE A – Identificação dos pilares do pavimento térreo



APÊNDICE B – Relatório do Software Eberick para armaduras dos pilares

Pilares do Pavimento 1º Pavimento

	Nome	Igual	Armadura B	Armadura H	Estribo centro
1	P1		2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
2	P2		2 e 10.0	2 e 10.0	e 5.0 c/12
3	P3		2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
4	P4	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
5	P5	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
6	P6		3 e 12.5	2 e 12.5	e 5.0 c/15
7	P7	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
8	P8		2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
9	P9	=P3	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
10	P10	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
11	P11		2 e 12.5	4 e 12.5	e 5.0 c/15
12	P12	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
13	P13		2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
14	P14	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
15	P15	=P6	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
16	P16	=P6	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
17	P17	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
18	P18	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
19	P19	=P3	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
20	P20	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
21	P21	=P6	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
22	P22	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
23	P23	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
24	P24		2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
25	P25	=P6	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
26	P26	=P3	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
27	P27	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
28	P28		5 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
29	P29		3 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
30	P30	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
31	P31	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
32	P32	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
33	P33	=P1	2 e 10.0	3 e 10.0	e 5.0 c/12
34	PELEV		2 e 10.0	2 e 10.0	e 5.0 c/12

Pilares marcados → Pilares a serem reforçados

ANEXO A – Planta tipo do edifício

