

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**FERNANDA TORRES GONÇALVES CASSAVARA
RAFAELA DOS SANTOS COSTA**

**ENGENHARIA DIAGNÓSTICA: TRINCAS EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO**

VOLTA REDONDA, RJ

2023

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ENGENHARIA DIAGNÓSTICA: TRINCAS EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
do UniFOA como requisito à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Discentes: Fernanda Torres Gonçalves
Cassavara
Rafaela dos Santos Costa

Orientador: Prof. Me. Francisco Roberto
Silva Abreu
Coorientador: Prof. Me. José Marcos
Rodrigues Filho

VOLTA REDONDA, RJ

2023



Fundação Oswaldo Aranha



FOLHA DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso intitulado "Engenharia Diagnóstica: trincas em estruturas de concreto".

Elaborado por Fernanda Torres Gonçalves Cassavara e Rafaela dos Santos Costa, apresentado publicamente perante a Banca Avaliadora, como parte dos requisitos para conclusão do Curso de Engenharia Civil do UniFOA.

Aprovado em 10 de novembro de 2023.

Banca Avaliadora:

.....
Professor Orientador - Francisco Roberto Silva de Abreu, Mestre, UniFOA

.....
Professor Coorientador - José Marcos Rodrigues Filho, Mestre, UniFOA

.....
Professora Avaliadora - Camila Martins Hosken, Doutora, UniFOA

.....
Professor Avaliador - Sérgio Luiz Taranto de Reis, Mestre, UniFOA

À Deus e às nossas famílias que estiveram conosco em todo processo sempre nos encorajando e nos compreendendo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus por nos ter sustentado e encorajado até aqui e pela sabedoria para escrever este Trabalho de Conclusão de Curso. Agradecemos também às nossas famílias por estarem conosco em todo processo e por terem compreendido todas as dificuldades e por nos terem acolhido. Agradecemos aos nossos professores, em especial ao nosso Orientador e ao nosso Coorientador por toda paciência e tempo despendido para nos ajudar a compreender todos os assuntos abordados ao longo desta Monografia.

RESUMO

Tendo por pressuposto a falta de cultura de manutenção preventiva no Brasil e que a sua deficiência acarreta a redução da vida útil de uma estrutura devido às patologias a qual será acometida, este trabalho avaliou as condições da mesoestrutura, feita em concreto armado, da obra de arte especial (passarela), que transpõe a rodovia Lúcio Meira, o Parque Ferroviário da CSN e a avenida da Integração, no bairro Aterrado, Volta Redonda – RJ.

A inspeção da passarela foi realizada através dos princípios da Engenharia Diagnóstica, com enfoque na manifestação patológica trincas, tendo por objetivo identificar suas causas e fornecer medidas de recuperação dos pilares acometidos por tais anomalias. Após as visitas e submissão dos pilares ao teste com fenolftaleína 1% alcoólica, identificou-se que os pilares 1 e 2 estão acometidos por carbonatação, sendo essa a causa das trincas desses pilares. Tendo como variante aos pilares acometidos por carbonatação, os pilares 3 e 4 possuem trincas por despassivação do aço e os pilares 5 e 6 estão acometidos por trincas devido a formação de etringita tardia.

Palavras-chave: Engenharia Diagnóstica; Patologias; Trincas; Concreto Armado.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Mecanismo de Formação de Fissuras.....	17
2.2	Trincas por Retração do Concreto.....	19
2.3	Trincas por Flexão	21
2.3.1	Momento de Fissuração	26
2.4	Trincas por Cisalhamento	27
2.5	Trincas por Recalque Diferencial.....	28
2.6	Trincas por Dilatação Térmica.....	32
2.7	Trincas por Despassivação do Aço	37
2.7.1	Carbonatação	40
2.7.2	Ataques por Íons Cloreto	43
2.7.3	Lixiviação.....	44
2.8	Trincas por Etringita Tardia.....	44
2.9	Engenharia Diagnóstica.....	46
3	METODOLOGIA	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5	CONCLUSÃO	64
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Abertura máxima de fissuras (W_k) em função da classe de agressividade ambiental (CAA)	16
Quadro 2- Vistorias técnicas realizadas na passarela que transpõe a rodovia Lúcio Meira, a linha do parque ferroviário da CSN e o bairro aterrado.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Perda de Resistência Média por Aumento Súbito de Temperatura para Concretos com fck's 25, 30 e 40 Mpa	36
Tabela 2- Velocidade de Carbonatação	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Trinca originada a partir de Tensão Interna Trativa	18
Figura 2- Tensão Interna de Cisalhamento no Plano atuante na fissura e sobrecarga (S) atuante no material.....	19
Figura 3- Retração Plástica do Concreto	20
Figura 4- Pórtico Sujeito a Flexão Composta.....	22
Figura 4.1- Diagrama de Momento Fletor – Pórtico Sujeito a Flexão Composta.....	23
Figura 5- Viga Isostática Biapoiada.....	23
Figura 5.1- Diagrama de Momento Fletor – Viga Isostática	24
Figura 6- Viga Hiperestática.....	24
Figura 6.1- Diagrama de Momento Fletor – Viga Hiperestática.....	25
Figura 7- Trajetória de Tensões Internas	26
Figura 8- Configuração Trinca por Cisalhamento.....	28
Figura 9- Recalque Diferencial de Fundações	29
Figura 10- Trincas por Recalque Diferencial em Edifício com Vedação em Alvenaria Não-Estrutural.....	31
Figura 11- Trincas por Recalque Diferencial em Edifício de Parede de Concreto Armado	32
Figura 12- Exposição a Diferentes Solicitações Térmicas Naturais	34
Figura 13- Trincas por tensão interna de cisalhamento ocasionada pela dilatação térmica da laje.....	36
Figura 14- Trincas em pilar devido a movimentação térmica das vigas	37
Figura 15- Tipos de Corrosão do Aço.....	38
Figura 16- Processo de Fissuração por Despassivação do Aço	39
Figura 17- Ciclo de Degradação do Concreto Armado por Despassivação do Aço ..	40
Figura 18- Difusão do Dióxido de Carbono Através dos Poros do Concreto.....	42
Figura 19- Passarela que Transpõe a Rodovia Lúcio Meira, o Parque Ferroviário da CSN e a Avenida da Integração no Bairro Aterrado, Volta Redonda	50
Figura 20- Pilar 1 com perda de parte da camada de cobertura de concreto.....	51
Figura 21- Pilar 1 com Trinca de 0,5mm	53

Figura 22- Pilar 1 – Carbonatação	54
Figura 23- Pilar 2 – Carbonatação	55
Figura 24- Pilar 2 – Trinca por Carbonatação	56
Figura 25- Pilar 3 – Trinca por Despassivação do Aço	57
Figura 26- Pilar 4 – Trinca por Despassivação do Aço	58
Figura 27- Pilar 5 – Trinca por Etringita Tardia.....	59
Figura 28- Pilar 6 – Rachadura por Etringita Tardia	60

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAA – Classe de Agressividade Ambiental

DEF – *Delayed Ettringite Formation* (Formação de Etringita Tardia)

DMF – Diagrama de Momento Fletor

f_{ck} – *Feature Compression Know* (Resistência Característica a Compressão)

NBR – Norma Brasileira

OAE – Obra de Arte Especial

W_k – Abertura Máxima de Fissuras

1 INTRODUÇÃO

A falta de manutenção preventiva tem acarretado a muitas construções, sejam elas edificações ou obras de arte (pontes, viadutos e passarelas), quadros de degradação de seus sistemas, como: vedação, estrutura, instalações, revestimento etc. Num paralelo ao corpo humano, uma construção quando “doente” apresenta sintomas que ao serem diagnosticados precocemente podem evitar sinistros de elevadas intensidades. Logo, em virtude dessas anomalias, torna-se necessário diagnosticar as possíveis causas das manifestações patológicas, para, compreendido seus mecanismos, combatê-los através de medidas corretiva e sanadora mais adequada, evitando assim o agravamento do processo, que pode culminar com o colapso estrutural do elemento estudado.

Isto posto, busca-se os fundamentos da parte da Engenharia que trata da identificação, tratamento e recuperação dos sistemas acometidos por patologias, denominada *Engenharia Diagnostica*. Este Trabalho se concentra num recorte dos diversos fatores que provocam trincas nos sistemas estruturais em concreto armado, tendo como base as Normas Brasileiras (NBR) fornecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), como a NBR 6118 e a NBR 15575-2, além de livros e dissertações, como o livro “Trincas em Edifícios: Causas, Prevenção e Recuperação” do autor Ércio Thomaz. Outrossim, esta monografia finaliza seu estudo com uma inspeção sobre a obra de arte especial (OAE), a passarela sobre a linha férrea, pertencente ao Parque da CSN, que transpõe a rodovia Lúcio Meira e a avenida da Integração, no bairro Aterrado, em Volta Redonda – RJ.

A relevância do presente trabalho é o diminuto efetivo de profissionais que se dedicam às patologias nas construções, levando a profissionais pouco qualificados no mister, a adotarem soluções “coringas”, pulando as etapas de levantamentos, anamnese e diagnóstico. As conclusões precoces aos estudos promovem recomendações ou proposições inócuas, que podem auxiliar na ocultação e evolução das patologias, agravando o estado da peça estrutural quando se manifesta de maneira mais intensa. Tal insciência, muitas vezes, pode levar ao colapso de parte ou do todo da peça estrutural.

Em suma, faz-se imperativo o incentivo na qualificação e formação de profissionais mais afinados às particularidades das manifestações, dedicando-se aos estudos correlatos. Portanto, objetiva o presente trabalho, através dos princípios da

Engenharia Diagnóstica, identificar por métodos de anamnese, análise e simulações diagnósticas, as manifestações patológicas, suas causas e possíveis soluções aos fenômenos de trincas que acometem as estruturas de concreto armado da OAE analisada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Todo elemento construtivo, seja ele estrutural, de vedação ou revestimento, quando acometido por uma fissura ou trinca revela a presença de uma manifestação patológica que deve ser investigada de pronto. Segundo Thomaz (2020), quando uma peça estrutural fissura devido à sobrecarga, desde que não haja nenhum fator limitante, seja pelo dimensionamento do elemento, seja pela intensidade da tensão, há uma nova distribuição de tensões ao longo da peça fissurada e dos elementos adjacentes. Desse modo, as cargas solicitantes são absorvidas por todo o elemento ou por parte dele.

A Norma de desempenho para edificações habitacionais, NBR 15575-2 (2013) define fissura de componente estrutural, em seu item 3.8, como “seccionamento na superfície ou em toda a seção transversal de um componente, com abertura capilar, provocada por tensões normais ou tangenciais”. Thomaz (2020) diferencia fissura, trinca e rachadura a partir de suas espessuras, classificando fissuras para aberturas em um material de até 0,5mm, trinca para aberturas entre 0,5mm e 3mm e rachaduras para aberturas acima de 3mm.

Ainda no item 3.8 da NBR 15575-2 (2013), fissuras são diferenciadas em ativas e passivas. Ativas são aquelas cujas aberturas permanecem em evolução devido a movimentações higrotérmicas, entre outras, enquanto as passivas não possuem variações, permanecem estáveis a partir de determinada abertura ou deformação.

A Norma de procedimentos para execução de estruturas de concreto, NBR 14931 (2004), no item 10.1, apresenta alguns fatores que favorecem o aparecimento de fissuras no início da vida útil do concreto, isto é, logo após a concretagem, são eles:

- Mudanças bruscas de temperatura;
- Secagem;
- Chuva forte;
- Água torrencial;
- Congelamento;
- Agentes químicos;

- Choques e vibrações que prejudique a aderência do concreto à armadura.

A Norma de procedimento para projeto de estruturas de concreto, NBR 6118 (2014), na tabela 13.4, delimita o limite de abertura de fissura para peças de concreto armado, para que não haja risco de corrosão da armadura, em espessuras entre 0,2mm e 0,4mm (quadro 1). Caso a fissuração apresente risco ao funcionamento da estrutura, a Norma sugere a adoção de limites inferiores a 0,4mm.

Quadro 1: Abertura máxima de fissuras (W_k) em função da classe de agressividade ambiental (CAA)

CAA	INTENSIDADE	AMBIENTE	W_k
I	Fraca	Rural	$W_k \leq 0,4\text{mm}$
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	$W_k \leq 0,3\text{mm}$
III	Forte	Marinha	
		Industrial	
IV	Muito Forte	Industrial	$W_k \leq 0,2\text{mm}$
		Respingo de Maré	

Fonte: Adaptado de ABNT, 2014

A NBR 6118 (2014) explica, em seu item 7.6.1, que o risco de corrosão do aço, e sua evolução, dependem do cobrimento (espessura de concreto até a armadura) e da qualidade do concreto. Portanto, o concreto protege a armadura fisicamente (cobrimento) e quimicamente (qualidade). A reação química entre oxigênio e vapor d'água gera a oxidação do aço, tendo por consequência, sua perda de resistência, perda de seção, quando entra em corrosão, e redução de sua vida útil.

A proteção química refere-se ao pH alcalino do concreto (entre 12 e 14), devido a formação de Hidróxido de Cálcio (Ca(OH)_2), a partir das reações de hidratação dos silicatos de cálcio (equação 1). O hidróxido de cálcio, ao dissolver-se na água, preenche os poros do concreto, gerando uma alcalinidade na ordem de 12,6 (JÁCOME; MARTINS, 2005). Quando ocorre a despassivação (perda de proteção) do aço, concreto com pH inferior a 09, segundo Soares e Vasconcelos (2015), há o

aumento de seção do aço original, em virtude da formação de compostos ferrosos expansivos. Por conseguinte, surgem tensões internas e há a formação de fissuras capilares, que podem evoluir para trincas no concreto. Tal fenômeno será abordado no item 2.7.

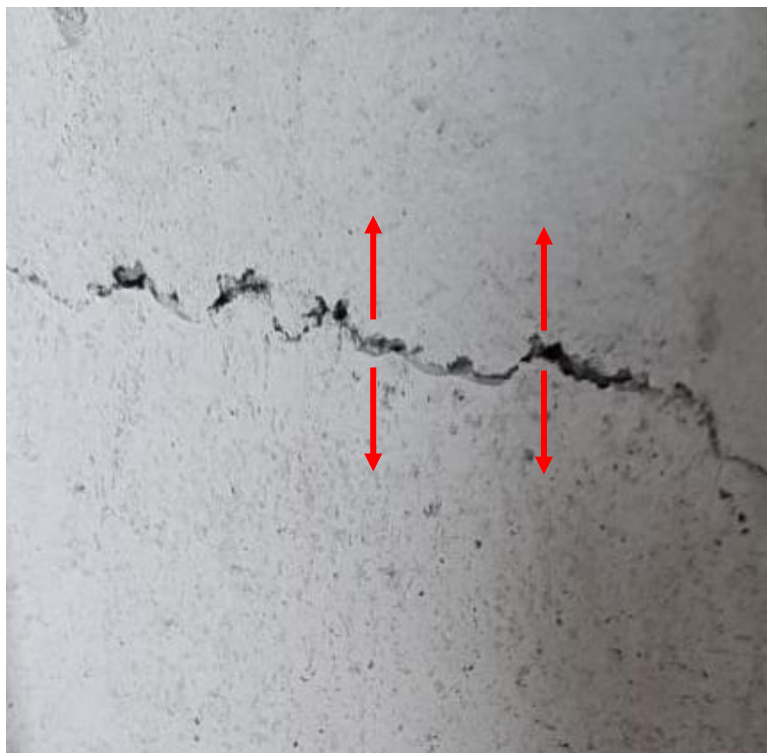


A perda da proteção química fornecida pelo concreto pode ocorrer por lixiviação, ataque de íons cloretos ou carbonatação. Uma vez atingindo o aço, esses componentes o levam a corrosão. Esses elementos podem contaminar o concreto durante sua produção, ou seja, pelos agregados ou pela água de amassamento, ou através do ambiente em que a peça de concreto armado está localizada, como em locais industriais ou com respingos de maré (CAA IV).

2.1 Mecanismo de Formação de Fissuras

A fissura ocorre como forma de aliviar tensões na qual o material está sendo submetido e que geram uma deformação excessiva. Ou seja, quando há mais tensões do que o material pode resistir, são geradas tensões internas (figura 1), ou seja que atuam de dentro para fora no elemento, que provocarão essa abertura no material.

Figura 1: Trinca originada a partir de Tensão Interna Trativa

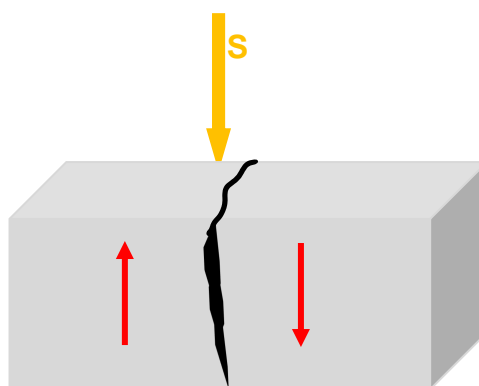


Fonte: Autores, 2023

Essas tensões internas podem ser divididas em 3 tipos, sendo o primeiro o mais comum:

1. Tensões trativas: as tensões de tração atuam na parte interior do elemento, originando as aberturas, como pode ser observado na figura 1.
2. Tensões de cisalhamento no plano: o cisalhamento ocorre gerando o deslizamento de uma superfície sobre a outra, ocasionando o surgimento da fissura. (figura 2)
3. Tensões de cisalhamento fora do plano: a tensão de cisalhamento atua sobre a fissura de modo que ela se mova paralelamente a sua superfície.

Figura 2: Tensão Interna de Cisalhamento no Plano atuante na fissura e sobrecarga (S) atuante no material



Fonte: Autores, 2023.

As tensões cisalhamento, tanto no plano quanto fora, são comumente observadas em fissuras por dilatação térmica em um elemento adjacente. Isto é, a expansão de determinado material gera compressão em materiais adjacentes, criando esforços cisalhantes e, conseqüentemente, fissuras e trincas. A exemplo, temos uma laje submetida a um diferente gradiente de insolação ao longo de sua área. Por conseqüência, a peça de concreto armado dilatará de forma diferenciada, gerando tensões de cisalhamento nas peças adjacentes.

2.2 Trincas por Retração do Concreto

A retração é a diminuição do volume do concreto a partir da perda de água de amassamento, quimicamente inerte, através do processo de exsudação (“suor” do concreto) e evaporação, após seu processo de cura. A retração pode ser dividida em 4 tipos:

- I. Retração Plástica: devido a exsudação antes da pega (endurecimento) do concreto. Ocorre na fase plástica do concreto (figura 3);

- II. Retração Hidráulica: devido a exsudação após a pega do concreto, isto é, após o concreto atingir a resistência a compressão definida através de seu traço, sendo agravada por uma cura mal feita;
- III. Retração Química: devido a formação de hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado no concreto que possuem um volume final menor do que o inicial;
- IV. Retração Térmica: devido as reações químicas exotérmicas que aceleram a evaporação da água de amassamento.

Segundo Süssekind (1989),

“No processo de retração, a água é inicialmente expulsa das fibras externas o que, criando condições de deformações diferenciais entre a periferia e o miolo, gera tensões capazes de provocar fissuração.” (SÜSSEKIND, 1989)

Figura 3: Retração Plástica do Concreto



Fonte: Autores, 2023

Considerando que as reações químicas que acontecem devido à combinação entre cimento e água são reações exotérmicas, ou seja, que liberam calor, e que a perda da água quimicamente inerte acontece por meio da exsudação, a temperatura terá maior influência no processo de retração. O aumento de temperatura e de ventos

favorecerá a evaporação mais rápida da água, aumentando o aparecimento de trincas por retração. Ademais, Sússekind (1989) apresenta o ambiente seco, a espessura da peça, maior consumo de cimento e maior fator água-cimento, como fatores intensificadores da fissuração no elemento de concreto.

Portanto, para evitar essas trincas é necessário ter o traço do concreto bem dimensionado e ter o controle da cura do concreto, de modo a retardar a perda da água de amassamento nos primeiros dias após a concretagem. Esse retardo da exsudação pode ser feito evitando o contato da peça estrutural com o meio ambiente, seja mantendo a forma da peça (em caso de formas de madeira, elas não podem estar ressecadas), para pilares, vigas, pilar-parede e viga-parede, seja utilizando manta têxtil com água, para lajes e outros elementos expostos ao ambiente. Isso deve ser feito até que o concreto atinja a resistência necessária contra essas tensões trativas, cerca de 10% da sua resistência característica a compressão (f_{ck}), geradas pela deformação diferencial. Uma alternativa mais econômica para lajes é a formação de uma lâmina de água sobre o elemento, com adição de gelo para os dias de calor extremo. É necessário que a cura seja interrompida apenas quando a resistência a tração do concreto seja aumentada, pois desse modo não ocorrerá fissuramento devido a retração (NETO, 2018).

Já para combater trincas por retração hidráulica, Milagres, 2019, sugere a

“colocação de juntas devidamente localizadas, redução do fator água/cimento, utilização de armadura de pele nas vigas, utilização de agregados maiores, utilização de agregados miúdos isentos de argila.”

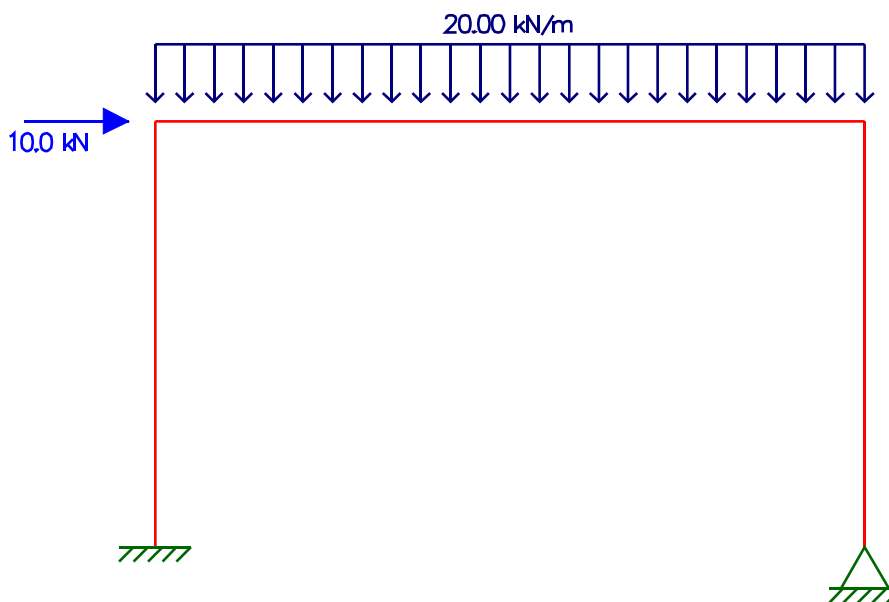
2.3 Trincas por Flexão

A Flexão é caracterizada pela curvatura do eixo do elemento de concreto armado quando solicitado por uma carga. Desse modo, enquanto uma parte da peça é comprimida a outra é tracionada. Essa deformação é dividida em três tipos:

1. Flexão Pura: quando há apenas um esforço, o momento fletor. Ou seja, não há tensões normais ou cortantes;
2. Flexão Simples: quando há dois esforços, momento fletor e cortante. Não há esforço normal;

3. Flexão Composta: quando há a presença dos três esforços, momento fletor, cortante e normal. (figura 4)

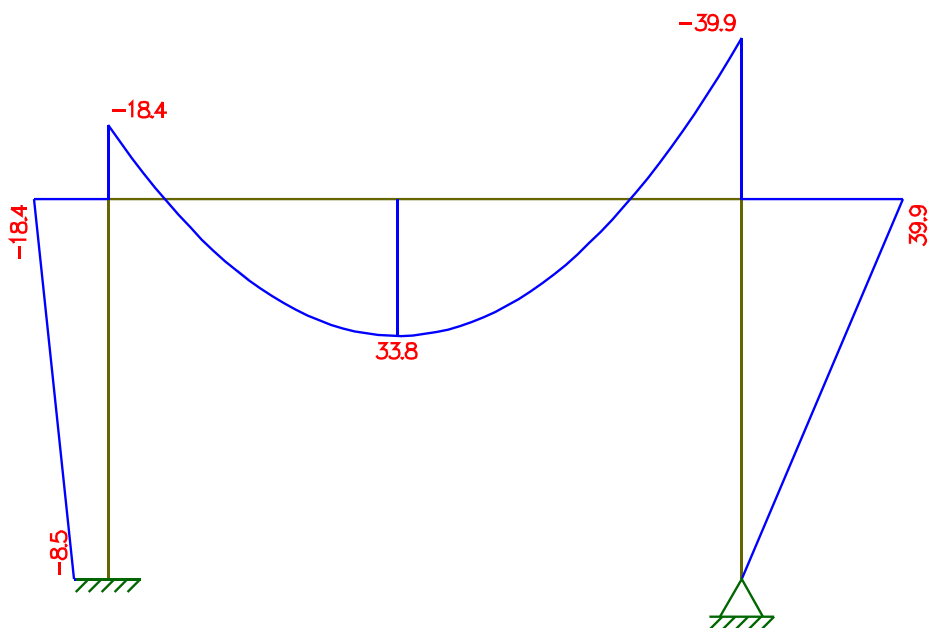
Figura 4: Pórtico Sujeito a Flexão Composta



Fonte: Ftool, 2023

A partir da análise do Diagrama de Momento Fletor (DMF) é possível identificar o momento fletor máximo, conseqüentemente, onde acontece as maiores deformações do componente. A figura 4.1 representa o DMF do pórtico que está sujeito a flexão composta, apresentado na figura 4.

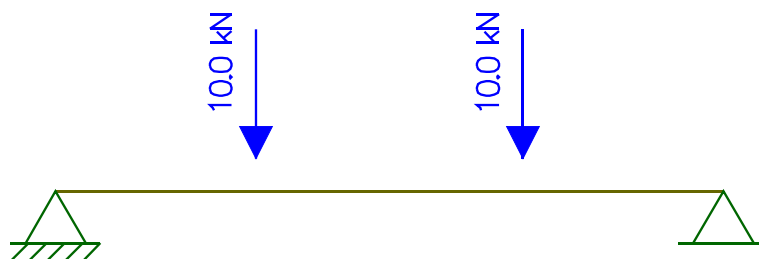
Figura 4.1: Diagrama de Momento Fletor – Pórtico Sujeito a Flexão Composta



Fonte: Ftool, 2023

Um mesmo elemento pode estar sujeito a mais de um tipo de flexão, como é o caso da viga isostática representada na figura 5. Essa peça está sujeita a flexão pura em seu trecho central e a flexão simples em suas extremidades.

Figura 5: Viga Isostática Biapoiada



Fonte: Ftool, 2023

A figura 5.1, representa o DMF de uma viga isostática, cujo os esforços estão representados na figura 5. A flexão pura pode ser observada no trecho II da viga, em que a deformação a flexão ocorre, unicamente, devido ao momento fletor atuante. Já nos trechos I, há a atuação da força cortante P_1 em dois pontos da viga. Portanto, nestes dois trechos, ocorre a flexão simples.

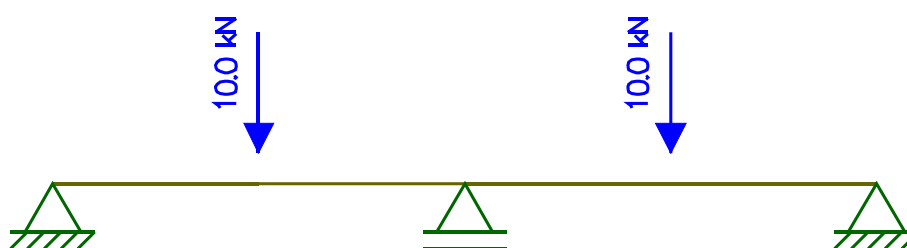
Figura 5.1: Diagrama de Momento Fletor – Viga Isostática



Fonte: Ftool, 2023

A partir do comportamento do elemento estrutural, apresentado em seu DMF, define-se o tipo de armadura que será usada para resistir as tensões trativas, que surgem a partir do peso próprio da peça e dos carregamentos que ela será sujeita, e para evitar a fissuração excessiva na peça. Desse modo, no segundo caso apresentado, figura 5.1, por se tratar de uma viga isostática, com momento fletor atuando apenas em sua parte inferior, a armadura adotada será uma armadura positiva, ou seja, que estará presente apenas em sua parte inferior.

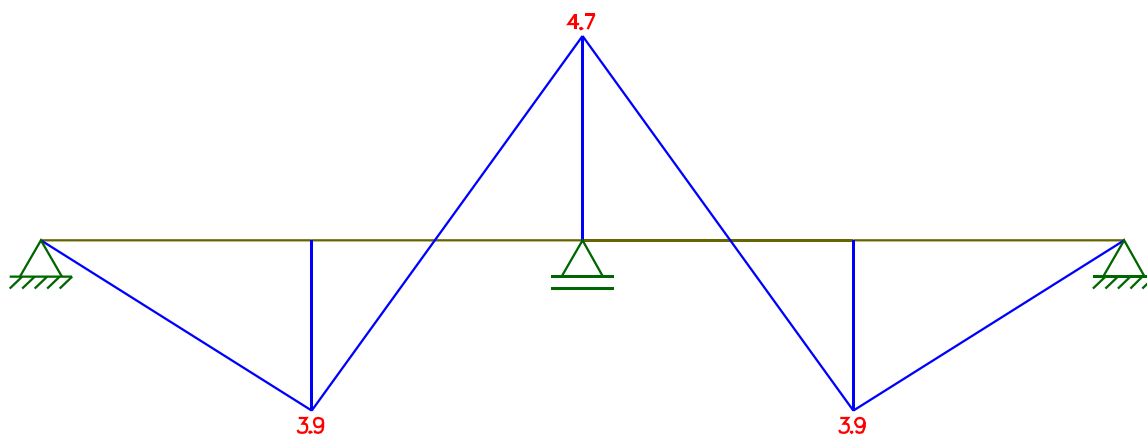
Figura 6: Viga Hiperestática



Fonte: Ftool, 2023

Já na figura 6, viga hiperestática, sujeita a flexão simples, percebe-se que, devido sua deformação, que pode ser observada em seu DMF (figura 6.1), faz-se necessário, além das armaduras positivas, o uso de armaduras negativas para combater as trações na parte superior da viga. Quanto maior o momento fletor do elemento, maior sua deformação a tração e, conseqüentemente, a área de armadura para combater as solicitações de tração serão maior.

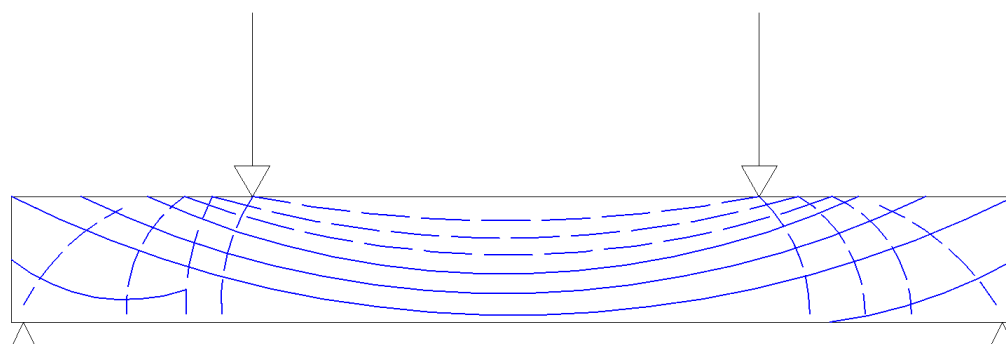
Figura 6.1: Diagrama de Momento Fletor – Viga Hiperestática



Fonte: Ftool, 2023

O dimensionamento de estruturas de concreto armado, segundo as determinações presentes na NBR 6118 (2014), procura limitar as fissurações na região tracionada do elemento devido sua deformação, estética e durabilidade (THOMAZ, 2020). Segundo Süssekind (1989), as fissuras em uma viga submetida a flexão, ocorrem perpendicularmente ao curso das tensões trativas, estendendo-se próximo a linha neutra (figura 7). As fissurações iniciam-se quando a peça de concreto armado sai do estágio 1 e entra no estágio 2, ou seja, o concreto não possui mais resistência suficiente aos esforços de tração e o aço passa a ser solicitado.

Figura 7: Trajetória de Tensões Internas



Legenda:

- Tensões Internas de Tração
- - - - - Tensões Internas de Compressão

Fonte: Adaptado de Süssekind, 1989

Quando há o aumento sucessivo de cargas, há o aumento da espessura das aberturas que estão nas regiões de maiores tensões trativas, segundo seu diagrama de momento fletor, elevando-as ao patamar de trincas. Quando o aço ultrapassa seu limite de escoamento, o elemento entra em processo de ruptura. Durante o processo de escoamento, surgem fissuras a 45° graus próximos aos apoios (região com maiores esforços cortantes), e há a elevação da linha neutra. Com a elevação da linha neutra, há o aumento da região tracionada e diminuição da região comprimida. Com a diminuição da região comprimida, o concreto entra em ruptura por excesso de compressão.

2.3.1 Momento de Fissuração

Momento de fissuração representa o instante em que a peça de concreto armado sai do estágio 1 e entra no estágio 2 (ABNT, 2014). Essa transição é marcada pela fissuração da peça no instante em que o concreto não possui mais resistência a tração suficiente as cargas a qual está sendo solicitada, e o aço sai do estado passivo ao estado ativo. Essa ativação do aço ocorre por meio da aderência entre os materiais.

Nos dimensionamentos atuais, muito se utiliza as barras de aço nervurado devido o favorecimento a aderência que elas fornecem. Entretanto, quando são utilizadas barras lisas, por não fornecerem a mesma aderência que o aço nervurado, a NBR 6118 (2014), recomenda que o momento de fissuração, equação 2, seja reduzido a 50% de seu valor.

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t} \quad (2)$$

Onde,

M_r = Momento de Fissuração

I_c = Momento de Inércia

y_t = Distância das fibras tracionadas ao centro de gravidade da seção

f_{ct}^* = Resistência a Tração

α = Fator de correlação entre resistência a tração direta e tração na flexão

Sendo,

$\alpha = 1,2$ para seções T ou T duplo;

$\alpha = 1,3$ para seções I ou T invertido;

$\alpha = 1,5$ para seções retangulares.

*Usar resistência a tração no estado limite de formação de fissuras e no estado limite de deformação excessiva.

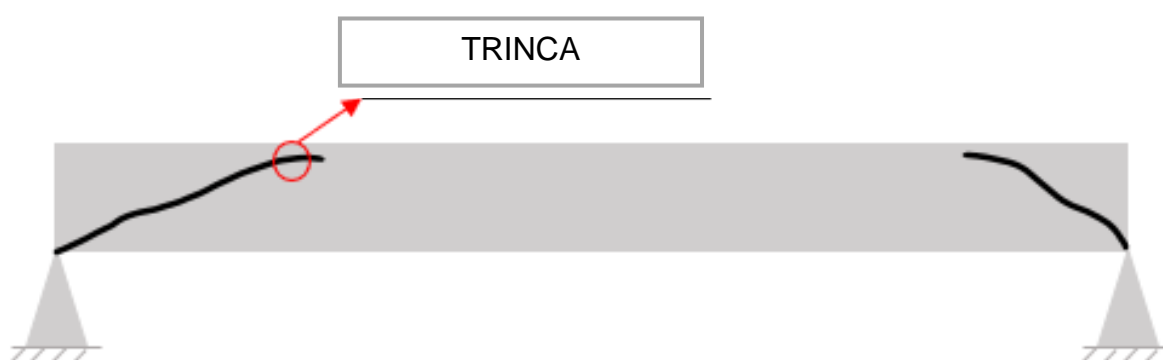
2.4 Trincas por Cisalhamento

O cisalhamento é caracterizado pela atuação de esforço cortante perpendicularmente ao plano da peça. Para combater essas tensões, são dimensionados armações, especificamente estribos, verticais ou inclinados, que são

distribuídos ao plano perpendicular ou inclinados a 45° da peça. Desse modo, eles atuam resistindo a essas tensões e combatendo deformações excessivas.

A fissuração acontece quando os estribos foram subdimensionados, seção insuficiente de aço, quando são dispostos incorretamente ou quando há sobrecarga da estrutura. Esse tipo de fissuração é caracterizada pelo seu alinhamento a 45° saindo dos apoios (figura 8), ou seja, onde a força cortante é máxima.

Figura 8: Configuração Trinca por Cisalhamento



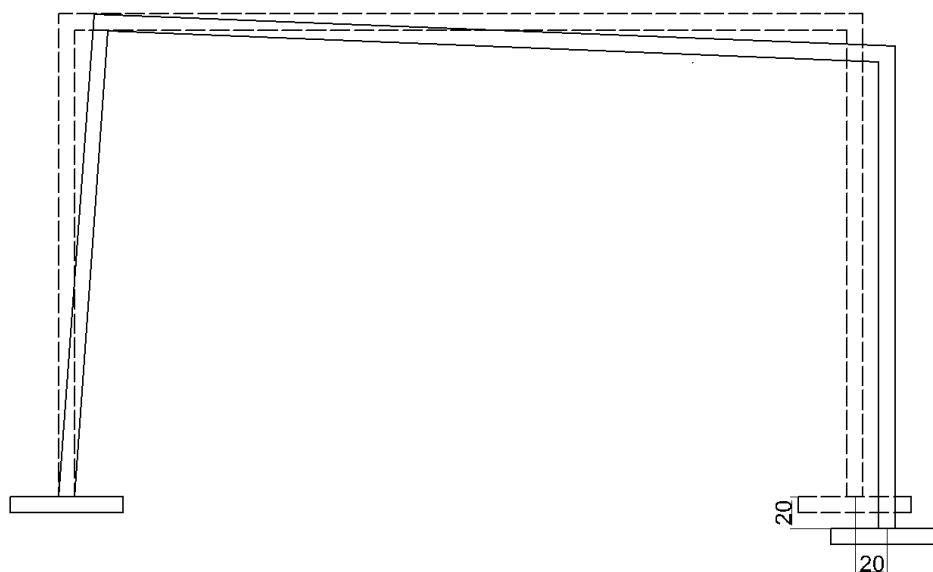
Fonte: Autores, 2023

2.5 Trincas por Recalque Diferencial

O recalque diferencial é uma anomalia geotécnica que afeta diretamente as fundações de uma estrutura. De acordo com a norma de Projeto e Execução de Fundações, NBR 6122 (1996)¹, no item 3.29, recalque diferencial é a diferença de deslocamento vertical entre dois elementos de fundação e a distância entre eles, ou seja, quando ocorre um assentamento desigual ou diferencial de uma fundação, como pode ser observado na figura 9. Este processo ocorre devido o deslocamento da fundação no terreno por sobrecarga no solo, distribuição de cargas distintas entre os elementos de fundação ou pelas diferenças existentes no solo. A variabilidade entre os tipos de fundação também é um fator favorecedor do recalque diferencial.

¹ Foi utilizado a revisão de 1996 da norma ABNT NBR 6122 em virtude da remoção dessa informação nas revisões posteriores.

Figura 9: Recalque Diferencial de Fundações



Fonte: Autores, 2023

O solo sob uma edificação pode ter diferentes características como compactação, umidade e resistência. Mediante essas diferenças, pode ocorrer o assentamento desigual entre as fundações, ou seja, uma parte da estrutura recalca mais do que a outra posto que a infraestrutura está apoiada em pontos diversos do sítio da construção. Isso significa pontos com cargas distintas e com perfis geológicos nem sempre uniformes, havendo por consequência, solicitações de formas desiguais e, de igual maneira, comportamentos também diferenciados, podendo gerar erros na escolha, no dimensionamento ou execução da peça de fundação, ocorrendo deslocamentos mais intensos em áreas com solo menos resistentes. Desse modo, surgem tensões não previstas em cálculo e deformações indesejáveis na supraestrutura. Logo, a edificação entra em um ciclo de redistribuição e acúmulo de tensões e de deformações até que haja sua detecção e recuperação.

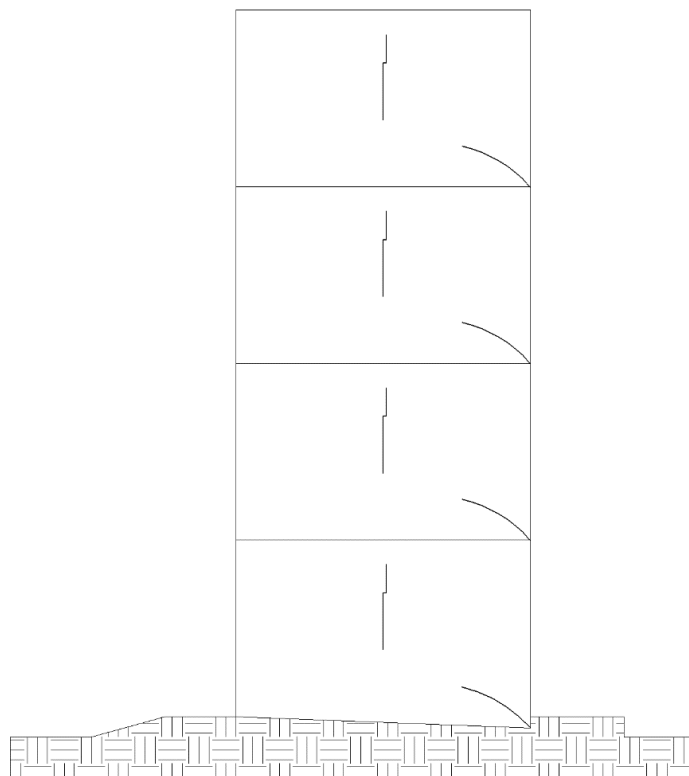
Além das diferenças entre solos encontrada em um mesmo terreno e o incorreto dimensionamento das fundações, fatores climáticos também podem acarretar recalques diferenciais. A variabilidade de umidade no solo pode diminuir sua resistência aos carregamentos distribuídos pelas peças de fundações e gerar suas movimentações devido a expansibilidade ocasionada pelo acúmulo de água entre os grãos.

A partir das deformações imprevistas em cálculo, surgem problemas nas edificações de ordem estrutural e de serviço, como trincas e desalinhamento de portas e janelas, comprometendo, portanto, o desempenho da edificação. Desta forma, para prevenir ou minimizar o recalque diferencial em edificações, fundações, é fundamental realizar estudos geotécnicos detalhados antes da concepção dos projetos de fundação, evitando, portanto, problemas na funcionabilidade da edificação e, em casos mais graves, seu colapso.

As trincas por recalque diferencial geralmente ocorrem em edificações devido a diferenças de assentamento. Dessa forma, as aberturas surgem por tração, recorrentemente onde ocorre o maior recalque, tendendo a formar um ângulo de 45° em direção ao local do rebaixamento do solo (THOMAZ, 2020). Já segundo Verçoza (1991), quando o recalque diferencial ocorre nas extremidades da edificação, posterior a fissura a 45° , surgem fissuras verticais.

A figura 10 exemplifica o caso em um edifício com sistema de vedação em alvenaria não-estrutural. Nesses casos, não há uma distribuição de tensões uniformes, gerando a configuração de fissuras como a apresentada.

Figura 10: Trincas por Recalque Diferencial em Edifício com Vedação em Alvenaria Não-Estrutural

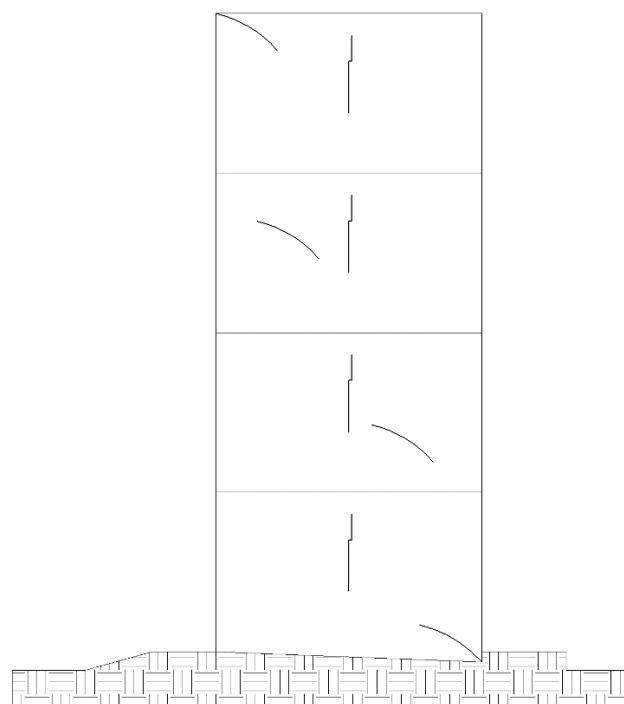


Fonte: Autores, 2023

Segundo Verçozza (1991), as trincas por recalque diferencial surgem primeiramente nos sistemas de vedação (paredes) e posteriormente, enquanto o processo não é interrompido, surgem nas estruturas de concreto armado, especialmente nas vigas e nos cintamentos. As trincas por recalque normalmente se formam em locais onde a carga é maior, ou seja, onde há o maior acúmulo de tensões, como locais de abertura, canto de parede, e principalmente a fundação, onde está toda a carga da edificação.

No caso de edificações com o sistema construtivo parede de concreto, as fissuras surgirão de forma mais homogênea do que em sistemas de vedação convencional, como pode ser observado na figura 11.

Figura 11: Trincas por Recalque Diferencial em Edifício de Parede de Concreto Armado



Fonte: Autores, 2023

2.6 Trincas por Dilatação Térmica

Todo material submetido a variações de temperatura está sujeito a dilatação térmica, seja ela positiva, expansão do material, ou negativa, retração. A expansão do material é causada pelo aumento de temperatura em sua estrutura, ou seja, absorção de energia em forma de calor, gerando agitação dos átomos em seu interior.

Em uma edificação, a principal fonte de calor é a radiação solar, salvo edificações industriais ou casos extremos como incêndios. Para análise da amplitude e taxa de variação de temperatura devido a exposição a radiação solar em um determinado elemento, segundo Thomaz (2020), deve-se ser levado em consideração a atuação combinada dos seguintes fatores:

- Intensidade da radiação solar: pode ser direta ou difusa e depende do local onde o material está inserido, a hora do dia e a estação climática;
- Umidade relativa do ar;
- Direção e velocidade do vento;

- Absorbância da superfície do material a radiação solar: quantidade de energia absorvida pelo material, isto é, quantidade de radiação solar absorvida. Este fator depende principalmente da cor do material, tendo cores escuras maior o quociente de absorbância;
- Emitância da superfície do componente: “taxa de emissão de radiação por unidade de área” (ABNT, 2005), ou seja, quanto de calor a superfície irá emitir ao ambiente.
- Coeficiente de condutância térmica superficial: representa numericamente a capacidade de condução de energia, calor, do material.
- Calor específico: capacidade térmica do material em relação a sua massa;
- Massa específica aparente;
- Coeficiente de condutibilidade térmica:

Os materiais sujeitos a variação de temperatura sofrem com os efeitos de dilatação e contração, causando fissuras em sua superfície quando ele não possui resistência as tensões trativas e cisalhantes que surgem em seu interior. De acordo com Thomaz (2020),

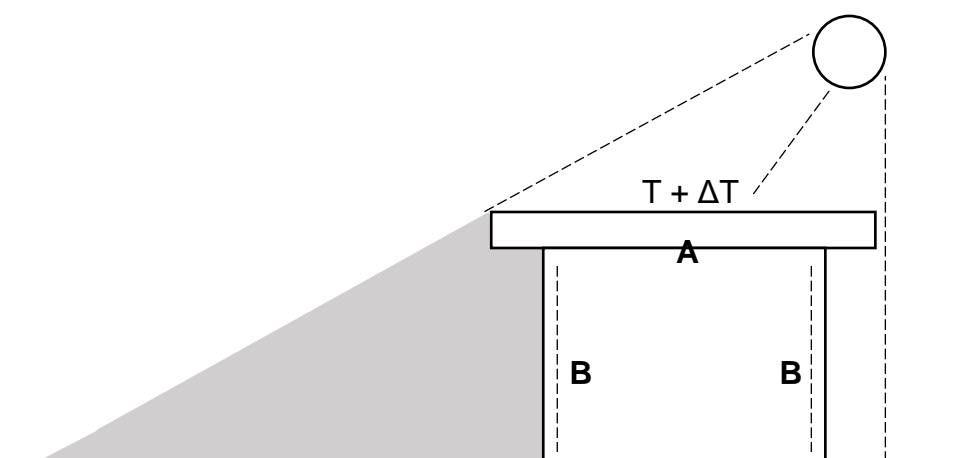
“as trincas de origem térmica podem também surgir por movimentações diferenciadas entre componentes de um elemento, entre elementos de um sistema e entre regiões distintas de um mesmo material”. (THOMAZ, 2020)

Isto é, geralmente ocorre por conta das variações de temperatura, e também pelas diferentes respostas térmicas que os materiais dão em relação a isso. Existem inúmeras causas de movimentação térmica diferenciada, mas dentre elas, as três principais, de acordo com Thomaz (2020, *apud* Bre, 1979a), são:

- Junção de Materiais com Diferentes Coeficientes de Dilatação Térmicas: quando diferentes materiais com coeficiente de dilatação térmicas distintos são unidos ou conectados, eles poderão ter diferentes níveis de dilatação. Isso pode levar a tensões internas e, eventualmente, a formação de trincas, um exemplo disso é a junção entre a alvenaria e a argamassa de assentamento em uma parede de alvenaria.

- Gradiente de Temperaturas em um Mesmo Componente: são componentes de construção, como lajes, que podem ter aumento de temperatura ao longo de sua extensão. A fase exposta a condições externas, como luz solar, irá ter temperaturas diferentes da fase que está protegida, causando assim tensões internas, formando trincas.
- Exposição a Diferentes Solicitações Térmicas Naturais: são elementos de uma estrutura que são expostos a diferentes condições térmicas, como pode ser observado na figura 12, com a relação entre o elemento A, cobertura, e o elemento B, paredes da edificação. Portanto, esta edificação pode sofrer movimentações térmicas diferentes, já que os elementos possuem grau de exposição a agentes naturais e coeficientes de dilatação distintos, assim sendo, os materiais expostos ao sol e ao vento, se aquecem e se esfriam em velocidades diferentes dos materiais que estão protegidos.

Figura 12: Exposição a Diferentes Solicitações Térmicas Naturais



Fonte: Adaptado de Thomaz, 2020

O autor Thomaz (2020) ainda ressalta que, no caso de movimentações térmicas diferenciadas é necessário se ater não somente a amplitude das movimentações, mas também a sua velocidade. Isso significa que materiais com baixa solicitação de variação de temperatura ou com menor resposta a essas atividades podem absorvê-las em maiores intensidades do que materiais adjacentes, caso essas movimentações sejam graduais e lentas. Ele também acrescenta que caso sejam

bruscas, e não haja tempo suficiente para que ocorra a reorganização de átomos e moléculas do material, a peça não terá o mesmo desempenho em absorver as movimentações do que quando elas forem lentas e graduais.

Outro fator a considerar são os choques térmicos, alta variação súbita de temperatura, como os ocasionados em incêndios. Segundo Thomaz (2020, *apud* Marin, 1962), as características necessárias para que um elemento resista aos choques térmicos são:

- Alto coeficiente de condutibilidade térmica;
- Baixo coeficiente de dilatação térmica linear;
- Baixo módulo de deformação;
- Alta resistência a tração.

Portanto, pode-se chegar à resistência do material a choque térmico a partir da equação 3:

$$R = (f) \frac{\lambda \cdot f_{ct}}{E \cdot \alpha} \quad (3)$$

Sendo,

R = Resistência ao choque térmico;

f_{ct} = Resistência característica a tração;

λ = Coeficiente de condutibilidade térmica;

E = Módulo de deformação longitudinal;

α = Coeficiente de dilatação térmica linear.

Em casos de incêndio, a estrutura é submetida ao aumento e diminuição bruscos de temperatura, devido ao aquecimento causado pelo incêndio e ao resfriamento para sanar o ocorrido. No caso de estruturas de concreto armado, esta submissão ocasiona o aparecimento de trincas, deslocamento e, principalmente, sua perda de resistência. De acordo com os testes realizados em laboratório por Coelho *et al.* (2020), quanto maior a resistência característica do concreto, maiores são as perdas de resistência quando submetidos a temperaturas de 300, 600, 900 e 1200°C e resfriamento brusco (tabela 1).

Tabela 1: Perda de Resistência Média por Aumento Súbito de Temperatura para Concretos com f_{ck} 's 25, 30 e 40 Mpa

Temperatura °C	Média do percentual de perdas (Aquecimento + Resfriamento) %
300	37,94
600	69,05
900	94,05
1200	95,58

Fonte: Adaptado de Coelho *et al.* (2020)

A configuração das fissuras por dilatação térmica varia de acordo com o material e com as movimentações térmicas a qual está sendo submetidos. Em um conjunto de elementos distintos, as tensões internas tendem a se manifestar, através das aberturas, sempre no material mais frágil. Por isso, após a expansão da térmica da laje, observa-se trincas em forma de escada (figura 13) nas paredes constituídas por alvenaria, seja de tijolo cerâmico ou cimentício. A argamassa de assentamento possui menor resistência as solicitações, tanto de tração quanto de cisalhamento, do que os blocos de vedação.

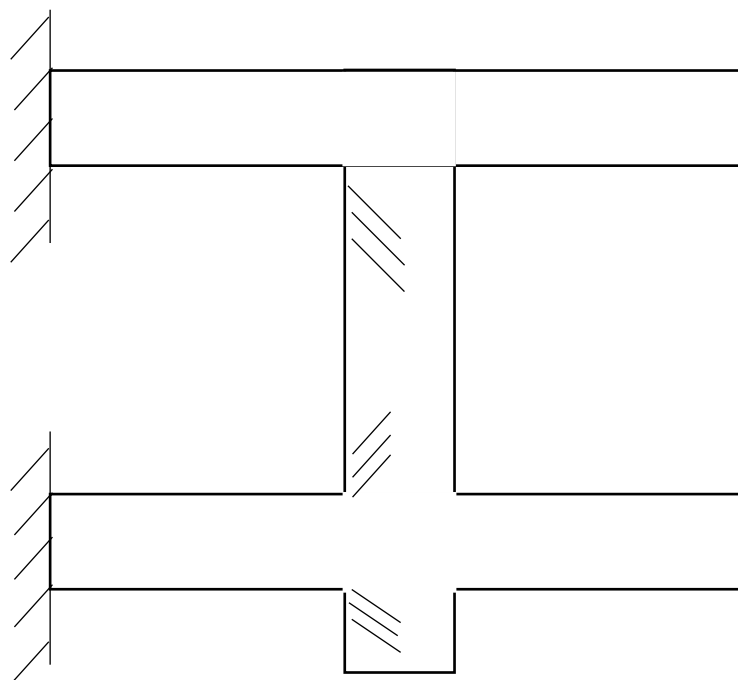
Figura 13: Trincas por tensão interna de cisalhamento ocasionada pela dilatação térmica da laje.



Fonte: Thomaz, 2020

No sistema tradicional composto por vigas e pilares em concreto armado, de acordo com Thomaz (2020), podem surgir trincas inclinadas nos pilares devido as movimentações térmicas que ocorrem nas vigas (figura 14). A principal causa desta fissuração, segundo o autor, é a inexistência de juntas de dilatação ou ter as aberturas e espaçamentos mal projetadas.

Figura 14: Trincas em pilar devido a movimentação térmica das vigas



Fonte: Adaptado de Thomaz, 2020

2.7 Trincas por Despassivação do Aço

A despassivação do aço ocorre quando o concreto para de fornecer sua proteção, seja ela física ou química, a armadura. Desse modo, o aço passa a estar sujeito ao processo de corrosão (destruição) eletroquímica (com presença de água).

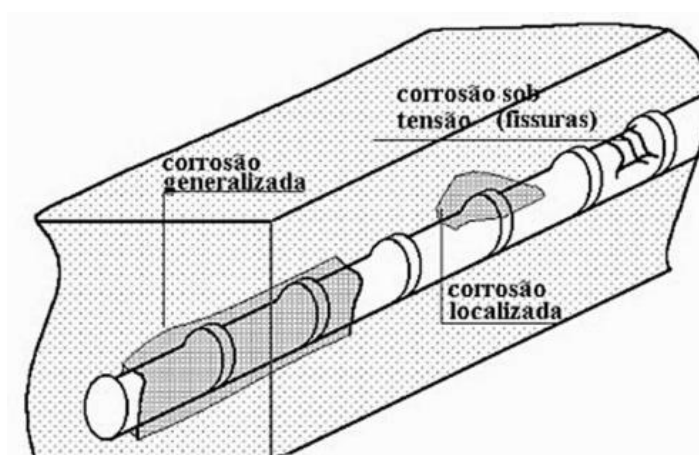
Durante a oxidação é formado o óxido de ferro hidratado ($Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$). Neste processo, o óxido de ferro exerce uma pressão sobre o concreto, gerando tensões internas na ordem de 15 MPa, ocasionando fissuras que acompanham o comprimento das barras de aço. As tensões internas surgem devido a expansão volumétrica do aço em cerca de dez vezes de seu volume inicial. (SOUZA; RIPPER, 1998).

A despassivação do aço, seja pela perda de proteção física seja pela perda de proteção química do concreto, gera a perda do filme óxido que o envolve, o colocando em processo de corrosão. Segundo Souza e Ripper (1998), tal manifestação patológica pode ser dividida em três tipos de atuação: corrosão por tensão fraturante (excesso de protensão), corrosão por hidrogênio atômico e corrosão por pite (figura 15).

A corrosão por hidrogênio atômico ocorre quando o elemento é exposto ao um ambiente ácido, rico em Sulfeto de Hidrogênio (H_2S), como em estações petrolíferas. O contato da peça de concreto com um ambiente rico em H_2S tem como consequência a perda de massa do aço e formação de sulfeto férrico ($Fe_2(SO_4)_3$) a partir da remoção da camada de ferro da superfície do aço (SANTOS, 2011). O hidrogênio em sua forma atômica acumula-se em defeitos existentes na rede cristalina do aço, ocasionando altas pressões dentro em seu interior, podendo gerar empolamentos caso o acúmulo ocorra em falhas superficiais do aço (ARAUJO, 2009). Ademais, o acúmulo de hidrogênio atômico reduz sua ductilidade e, conseqüentemente, sua resistência.

Já a corrosão a pite pode ser dividida em dois tipos: corrosão generalizada e corrosão localizada. A corrosão generalizada ocorre devido à redução de pH do concreto, como no caso de peças de concreto acometidas por carbonatação. Enquanto a localizada ocorre pelo ataque de íons agressivos, como os íons cloretos, em presença de oxigênio em umidade.

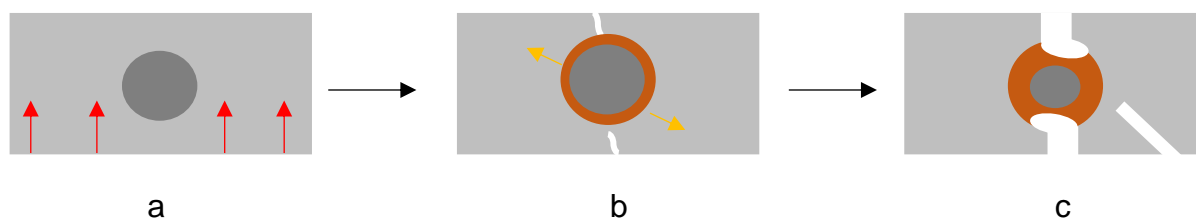
Figura 15: Tipos de Corrosão do Aço



Fonte: SOUZA; RIPPER, 1998

Para diminuir a exposição do aço a agentes deletérios, a NBR 6118 (2014) propõe o uso de concreto com baixa porosidade, o cobrimento adequado e o controle de fissuração. A figura 16 a seguir representa o processo de penetração de agentes deletérios no concreto, sua fissuração e a corrosão da barra de aço.

Figura 16: Processo de Fissuração por Despassivação do Aço



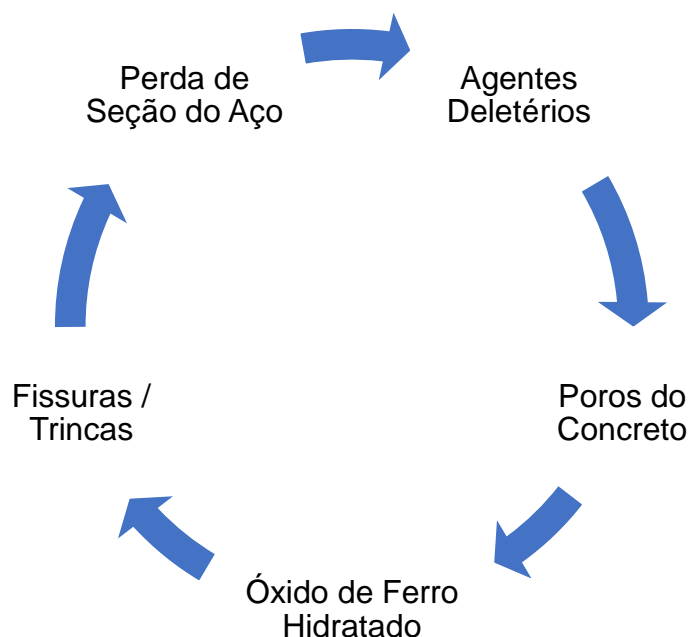
Fonte: Adaptado de SOUZA; RIPPER, 1998

A partir da figura 16, conclui-se que:

- a – Penetração de agentes deletérios no concreto, como Dióxido de Carbono ou Íons Cloretos;
- b – Devido a penetração de agentes deletérios, há a perda do filme óxido (camada passivadora) que protege o aço e há formação de óxido de ferro hidratado (ferrugem), gerando a expansão volumétrica da barra de aço. Por conseguinte, são geradas tensões internas no concreto, que por não possuir resistência a tração suficiente, fissura;
- c – A partir da fissura, os agentes permanecem penetrando no concreto, intensificando o processo de corrosão do aço, gerando perda de seção e o aumento das aberturas, tornando-as em trincas.

Logo, percebe-se que este processo gera um ciclo de degradação do concreto e do aço, aumentando a espessuras das trincas e intensificando a corrosão da armadura, como pode ser observado na figura 17. Isso ocorrerá até o colapso da peça de concreto armado ou até que este ciclo seja interrompido.

Figura 17: Ciclo de Degradação do Concreto Armado por Despassivação do Aço

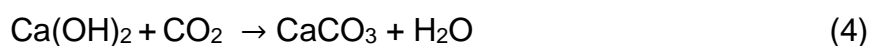


Fonte: Autores, 2023

As trincas por despassivação surgem quando o concreto não possui mais resistência as tensões internas que surgem devido a expansão do aço em corrosão. Elas se configuram, portanto, de forma paralela ao eixo de resistência a essas tensões. Em pilares, por exemplo, as trincas serão verticais.

2.7.1 Carbonatação

A Carbonatação do concreto é a redução de sua alcalinidade para pH inferior a 09 a partir da penetração do dióxido de carbono (CO_2) nos poros do concreto. A reação do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) com o dióxido de carbono resulta em carbonato de cálcio e água (equação 4).



Segundo Souza e Ripper (1998), quanto maior for a concentração de dióxido de carbono, menor será o pH do concreto e mais profunda será a região carbonatada.

A propagação, em profundidade, da carbonatação dá-se a partir da seguinte equação (5):

$$-x = k \sqrt[n]{t} \quad (5)$$

Sendo,

-x = profundidade de penetração da carbonatação (cm)

k = constante em função da porosidade e permeabilidade do concreto (cm²/ano)

n = 2, para ambientes internos

n < 2, para ambientes externos

t = tempo (anos)

A partir da equação 5 percebe-se a relação entre as características do concreto e o ambiente em que a peça está inserida. Ou seja, quanto mais poroso e permeável for o concreto e quanto maior a classe de agressividade ambiental, maior será a profundidade de degradação por carbonatação.

A estimativa da velocidade de aprofundamento da carbonatação para concretos em perfeito estado de integridade pode ser observada na tabela 2 a seguir:

Tabela 2: Velocidade de Carbonatação

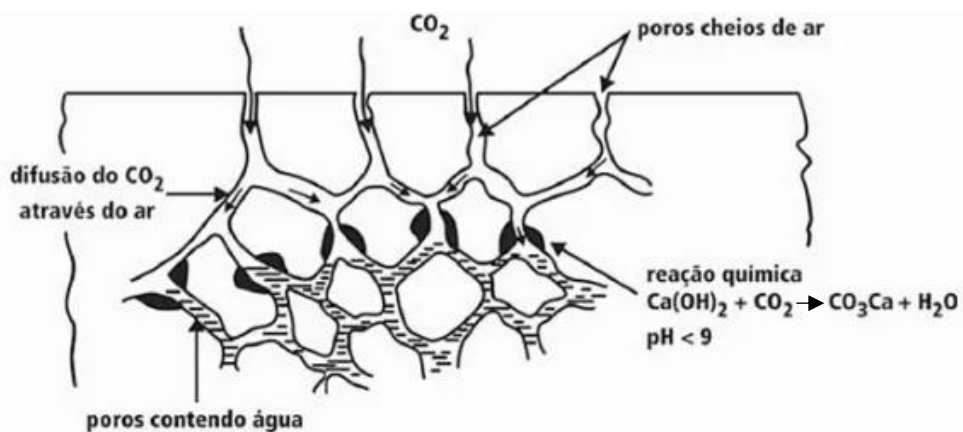
PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO (cm)	TEMPO (anos)
1	5
1,5	20
2,0	50
2,5	100

Fonte: FUSCO, 2008

A porosidade e permeabilidade do concreto são características ligadas diretamente ao seu fator água/cimento. Quanto menor o fator água/cimento, menor será a porosidade do concreto, conseqüentemente, maior será a dificuldade de difusão do CO₂. Outrossim, segundo Souza e Ripper (1998), quanto maior a saturação dos poros do concreto, menor a probabilidade de que o elemento seja atingido por

essa patologia, já que a migração molecular (difusão) entre o dióxido de carbono ocorre através de seus poros (figura 18).

Figura 18: Difusão do Dióxido de Carbono Através dos Poros do Concreto



Fonte: FUSCO, 2008

Esta patologia é caracterizada por atacar de forma generalizada o elemento de concreto armado, tanto no processo de degradação do concreto quanto no processo de corrosão de sua armadura. Isto é, o concreto será atingido ao longo de sua extensão e não somente em um ponto da peça. Por atingir primeiramente o comprimento do concreto, seu ataque não é tão profundo, como ocorre com o ataque realizado por íons cloretos. Essa característica justifica a lentidão no processo de aprofundamento da carbonatação, demorando 50 anos para atingir uma profundidade de 2cm, como apresentado na tabela 2 acima.

Claramente esta velocidade variará de acordo com a agressividade do ambiente em que a peça estrutural está localizada. Ou seja, existem fatores que são agravantes da situação, como indústrias siderúrgicas, intenso fluxo de veículos, entre outros. Portanto, os testes de carbonatação devem incluir a análise de profundidade do ataque.

Os testes de carbonatação são realizados com aspersão de fenolftaleína 1% alcoólica, a fim de identificar se o elemento de concreto está ou não acometido por carbonatação. A fenolftaleína é um indicador de alcalinidade tendo como parâmetros pH 8,0 o líquido incolor após a reação química, e o pH 10,0 o líquido em cor rosa. A partir disso conclui-se que ao aspergir o indicador se o líquido fica rosa, o concreto está com alta alcalinidade. O teste pode ser destrutivo ou não. O teste destrutivo, ou

seja, com remoção de parte da camada de cobrimento do concreto, é feito impreterivelmente para a identificação da profundidade de carbonatação. Entretanto, caso haja parte do elemento com concreto exposto, o teste não destrutivo é indicado para avaliar se houve ou não carbonatação. Caso o teste dê negativo, não será necessário a realização do teste destrutivo.

Para recuperar o concreto carbonatado, Araújo (2009), apresenta três métodos, sendo eles através da Realcalinização Química (RAQ) e através da Realcalinização Eletroquímica (RAE). Os três métodos são:

1. Solução Alcalina – RAQ: através de difusão e absorção da solução por meio de forças hidráulicas e por meio de capilaridade;
2. Íons Hidroxilas (OH⁻) – RAE*: atuação de ação catódica na superfície do aço;
3. Fluxo Eletro-osmótico – RAE*: transporte da solução alcalina pelos poros do concreto.

*Uso de corrente elétrica com consequente formação de campo elétrico.

Segundo a autora, o método por RAQ é mais eficiente do que RAE. Isso se deve a maior durabilidade do concreto quando exposto ao dióxido de carbono.

2.7.2 Ataques por Íons Cloreto

Os íons cloretos são extremamente nocivos ao aço que constitui o concreto armado, colocando-o em risco de corrosão já que o íon cloreto, junto de umidade e oxigênio, tem a capacidade de romper a camada óxido protetora (SOUZA; RIPPER, 1998). Mediante isso, a NBR 6118 (2014) proíbe o uso de aditivos com base de cloretos no concreto. Ademais, a norma de Concreto de Cimento Portland, NBR 12655 (2015), limita a exposição do concreto a cloretos, provenientes das exposições a agentes químicos de sais, degelo, água salgada e do mar, a 0,45 de sua relação água/cimento.

De acordo com Poulsen e Mejlbro (2006), existem diversos fatores que implicam no ingresso do cloreto, dependendo assim do local e da forma que já está a fissura do concreto. Dois fatores principais englobam este meio, sendo eles o intrínseco ou extrínseco. O intrínseco refere-se à composição do cimento e do

concreto, onde os mesmos implicam diretamente na construção, e no tamanho dos poros. Já o extrínseco, vai ocorrendo de acordo com o ambiente onde está localizado, com as condições ambientais daquele local e como a estrutura foi usada (Silva, 2011).

Segundo Helene (1993), os íons de cloreto é o principal ponto que atua nas estruturas de concreto em geral, principalmente em locais aonde possuem mar, ele pode entrar no concreto de diversas formas, sendo elas através:

- Do contato diretamente com a água do mar;
- De certos processos industrializados;
- Do contato com a maresia;
- Da contaminação dos materiais que são feitos por concreto;
- Dos aceleradores de pega que contém cloreto de cálcio.

2.7.3 Lixiviação

A Lixiviação é o processo de dissolução do hidróxido de cálcio a partir do transporte de água pelos poros do concreto, reduzindo seu pH. Como consequência dessa redução há a precipitação de sílica ($7 < \text{pH} < 10,5$) ou alumina ($\text{pH} < 7$), além de sua desagregação (SOUZA; RIPPER, 1998). Segundo a NBR 6118 (2014), o processo de Lixiviação ocorre pela ação de águas carbônicas agressivas, ácidas, puras, entre outras. A norma ainda recomenda que a restrição de fissuração como forma de controle dessa patologia. Ademais, também recomenda o uso de produtos específicos, como hidrófugos, a fim de proteger a superfície de concreto.

Segundo Oliveira (2016), a lixiviação vai se desenvolvendo até que haja um equilíbrio químico, para que assim ela pare de acontecer. Esta patologia afeta diretamente a estrutura da construção, podendo assim causar a degradação do concreto ao longo do tempo. Jorge *et al.* (2002), correlaciona o aumento da porosidade do corpo de prova, com a perda de massa quando ocorre a lixiviação, podendo assim fazer o controle das variáveis que são envolvidas no processo.

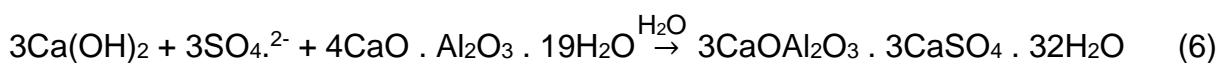
2.8 Trincas por Etringita Tardia

A etringita tardia (DEF) é uma reação química em que há a formação do mineral etringita posteriormente ao endurecimento do concreto. Segundo Horkoss *et al.*

(2016), os concretos compostos por cimentos com maior teor de SO_3 possuem maior risco de desenvolvimento de etringita tardia do que aqueles com menor teor. Ainda de acordo com Horkoss *et al.* (2016), o processo de formação da DEF pode levar a um significativo estado de deterioração do concreto.

De acordo com Torres e Andrade (2016), a expansão no concreto ocasionada por esse mineral tem como consequência a formação de fissuras direcionadas ou mapeadas em sua superfície. Para os autores a temperatura e umidade são fatores de maior influência para a formação de fissuras devido a DEF.

O ataque por sulfatos também é um fator significativo na formação de DEF nas estruturas de concreto. De acordo com a NBR 6118 (2014), águas e solos contaminados por sulfato ocasionam as reações expansivas e deletérias do concreto a partir da reação com a pasta de cimento hidratado. Thomaz (2020), afirma que a contaminação por sulfato pode ocorrer não somente estes fatores como, também, por materiais cerâmicos compostos por argilas com alto teor de sais solúveis. A equação 6 representa a formação de etringita a partir da reação de hidratação entre o sulfato e o aluminato hidratado do C_3A do cimento.



De acordo com Melo (2010), a reação entre os íons de sulfato e o cimento hidratado, ocorre quando há fontes externas, por exemplo água sulfatada e solo contaminado, ou através do próprio cimento, que é uma fonte interna. Além da contaminação por sulfato, Melo (2010), também afirma que o calor liberado durante as reações de hidratação do cimento promova uma deterioração prematura do concreto, pois ocasiona um aumento de temperatura com valores próximos a 90°C dependendo do quanto aquela estrutura foi exposta. Portanto, esse é um outro fator que ocasiona a formação da etringita tardia. Devido a esses fatores (temperatura e contaminação por íons sulfato), a etringita pode ser formada ao longo da vida do concreto. Outrossim, Collepardi (2003), cita que a expansão decorrente da DEF ocorre em concretos que foram expostos a altas temperaturas de forma precoce. Segundo Nanayakkara (2011), o processo de DEF pode vir ocorrer em diferentes tipos de estruturas de concreto, como em vigas, pilares de pontes e fundações etc., onde a temperatura dele pode ser bem alta.

Segundo Horkoss *et al.* (2016), a etringita tardia pode ocorrer de duas formas, tanto homogênea, quanto heterogênea, a homogênea refere-se a uma situação em que a expansão da etringita tardia é uniforme em todo o concreto, em oposição a expansão localizada em áreas específicas. Esse tipo de expansão uniforme pode ser mais fácil de monitorar e prever do que a expansão heterogênea, que por sua vez ocorre de forma não uniforme.

Ainda de acordo com Horkoss *et al.* (2016), a expansão heterogênea ocorre em áreas específicas do concreto, levando a formação de fissuras, rachaduras e danos localizados. Essas áreas afetadas podem ser mais suscetíveis a danos devidos à exposição a condições adversas, como a presença de sulfatos ou altas temperaturas.

2.9 Engenharia Diagnóstica

Segundo Gomide (2021), a Engenharia Diagnóstica é uma área que se concentra em criar diagnósticos, prognósticos e prescrições técnicas, para que assim seja feito tudo da melhor forma, visando a melhor qualidade na entrega de uma construção e na garantia da segurança e durabilidade. O objetivo principal dessa área é identificar defeitos, danos, falhas e problemas de desempenho em estruturas, para que assim as medidas corretivas sejam tomadas devidamente. Essa área envolve uma variedade de técnicas e métodos de análise, incluindo:

- **Vistoria:** processo realizado para avaliar a condição de uma estrutura ou edifício, é uma das etapas principais na análise diagnóstica. A vistoria tem por objetivo identificar qualquer problema, desgaste, que possa afetar a segurança, durabilidade ou funcionalidade da estrutura.
- **Inspeção:** é uma parte fundamental no processo de avaliação, ela envolve uma avaliação visual e física detalhadamente do local em questão, tendo como objetivo obter informações da situação atual da estrutura ou edificação.
- **Auditoria:** é um processo de avaliação independente e sistemática que visa verificar e validar as informações, procedimentos e resultados

relacionados a condição e integridade da estrutura. É essencial para garantir a precisão e a confiabilidade das conclusões obtidas.

- **Perícia:** refere-se à aplicação de conhecimentos técnicos para realizar investigações detalhadas e imparciais sobre questões específicas relacionadas a estrutura, edifícios ou instalações. A perícia é frequentemente usada em situações em que há questões legais envolvendo problemas técnicos em construções, e é conduzida por um perito, que é um especialista qualificado na área da engenharia em questão.
- **Consultoria:** refere-se à prestação de serviço especializados por partes de profissionais da área, para fornecer orientações em questões relacionadas a avaliação, inspeção do local. O profissional dessa área, é especializado para identificar o problema, avaliar e fazer as recomendações para melhorias ou reparos adequados.

A Engenharia Diagnóstica é uma área de grande importância, pois a partir do momento que se tem uma edificação ou sistema com manifestações patológicas é nela que se recorre, para que assim se evite danos maiores futuramente. De acordo com Gullo (2009), a engenharia diagnóstica tem uma similaridade muito grande com a Medicina, pois assim como se trata um paciente doente, também se trata uma edificação que está “doente”, precisando assim de cuidados e reparos.

Ainda de acordo com Gullo (2009), existem diversos pontos que se podem comparar a Engenharia Diagnóstica com a Medicina, sendo eles:

- **Anamnese Técnica da Edificação:** é um procedimento que envolve a coleta de informações relevantes sobre uma construção. Na medicina seria feita a coleta de informações sobre o paciente, já na Engenharia o “paciente” é a edificação, sendo assim, tem como objetivo diagnosticar as condições em que a estrutura está. Dentre os dados coletados na anamnese técnica estão o tempo de construção, o histórico de

manutenção, se já houve reformas anteriores ou não e etc. A técnica requer uma inspeção visual minuciosa para identificar manifestações patológicas como rachaduras, infiltrações, corrosão, entre outros problemas visíveis.

- **Diagnóstico Técnico da Edificação:** processo que visa identificar e avaliar de forma detalhada o estado geral de uma construção, tendo por objetivo principal entender as condições da edificação, assim identificando o problema, as patologias, e avaliando a qualidade de sua instalação.
- **Prognóstico Técnico da Edificação:** esse processo complementa o diagnóstico técnico da edificação, ou seja, ele se concentra em prever o comportamento futuro de uma edificação com base nas informações coletadas durante o diagnóstico. Enquanto o diagnóstico avalia o estado atual da edificação e identifica os problemas, o prognóstico visa antecipar como essas condições podem evoluir ao longo do tempo se nenhuma ação for tomada.
- **Prescrição Técnica da Edificação:** processo que envolve a elaboração de diretrizes e recomendações técnicas para a construção ou reforma de uma edificação com base em critérios técnicos e normas aplicáveis.
- **Sintomatologia Técnica da Edificação:** refere-se ao estudo dos sintomas ou sinais visíveis de problemas ou patologias em uma construção. Esses sintomas podem incluir rachaduras nas paredes, descolamento de revestimentos, infiltrações, corrosão em estruturas metálicas, entre outros diversos problemas que podem surgir. Através do estudo, pode-se descobrir as possíveis causas do problema e determinar ações corretivas necessárias.
- **Etiologia Técnica da Edificação:** visa identificar as causas, origens e fatores agravantes das patologias nas estruturas, envolvendo a análise detalhada das suas condições.

- Terapêutica da Edificação: refere-se ao estudo de como combater as anomalias e as falhas que vão aparecendo ao longo da construção.
- Patologia da Edificação: refere-se ao estudo e análise de problemas, defeitos que afetam as construções, sejam elas casas, pontes, edifícios, ou qualquer outra estrutura construída. Esses problemas podem ser causados por uma variedade de fatores, incluindo falhas de projetos, materiais inadequados, erros de construção, falta de manutenção, exposição a condições climáticas adversas, causando um desgaste natural ao longo do tempo, entre outros.

3 METODOLOGIA

Em vislumbre do assunto discorrido neste trabalho, foi realizado um estudo de caso a respeito das trincas encontradas na Obra de Arte Especial (OAE), passarela que transpõe a Rodovia Lúcio Meira, feixe ferroviário do pátio de manobras da CSN e a Avenida da Integração no bairro Aterrado, em Volta Redonda (figura 19). Para sua consecução, foram realizadas inúmeras vistorias técnicas verificando, registrando e classificando as condições do conjunto estrutural e as inúmeras manifestações patológicas a qual está acometida.

Figura 19: Passarela que Transpõe a Rodovia Lúcio Meira, o Parque Ferroviário da CSN e a Avenida da Integração no Bairro Aterrado, Volta Redonda



Fonte: Autores, 2023

O estudo da passarela foi realizado por meio de anamnese, método da Engenharia Diagnóstica, que consistiu em uma análise minuciosa das características estruturais da OAE, do local em que está alocada, incluindo fatores ambientais e sociais. Ademais, foi utilizado o método de sintomatologia, estudo das manifestações patológicas, e o de etiologia. Tal análise objetivou em diagnosticar as anomalias causadoras das manifestações observadas, definir o prognóstico e a prescrição adequada através da terapêutica.

A estrutura desta OAE em questão é composta tanto por estrutura metálica na superestrutura quanto por concreto armado na mesoestrutura, constituída por pilares

e vigas misuladas. Ao longo das vistorias, foram encontradas patologias tanto na superestrutura, avançado estado de corrosão, quanto na meso e infraestrutura.

Dos sete pilares analisados, todos apresentam trincas e, também, alguns apresentam perda de parte da camada de cobrimento de concreto (figura 20). Portanto, foram realizadas investigações, através do método de anamnese, a fim de diagnosticar as patologias que causaram as aberturas e perdas de cobrimento das estruturas de concreto armado.

Figura 20: Pilar 1 com perda de parte da camada de cobrimento de concreto.



Fonte: Autores, 2023

As vistorias técnicas foram realizadas conforme cronograma apresentado no quadro 2. As inúmeras vistorias tiveram como objetivo identificar, analisar e acompanhar a evolução das manifestações patológicas a qual a OAE está acometida.

Quadro 2: Vistorias técnicas realizadas na passarela que transpõe a rodovia Lúcio Meira, a linha do parque ferroviário da CSN e o bairro aterrado.

VISITA	DATA	OBJETIVO
1	12/08/2023	Análise da estrutura como um todo, identificando os elementos de concreto armado e as manifestações patológicas; Elaboração de hipóteses;
2	02/09/2023	Realização de testes de carbonatação;
3	23/09/2023	Análise do desempenho da estrutura e da influência da localização nas patologias identificadas;
4	19/10/2023	Demarcação dos pilares e análise das espessuras das aberturas.

Fonte: Autores, 2023

Posto a verificação de todos os pilares a partir dos métodos de anmense, as peças com perda de camada de cobrimento de concreto foram submetidos ao teste de carbonatação com fenolftaléina 1% alcoólica. A hipótese de carbonatação deriva-se dos seguintes fatores:

- Localização em zona de classe de agressividade ambiental II (urbana), com alto fluxo de veículos rodoviários;
- Indústria siderúrgica;
- Linha férrea.

Os três itens acima representam alta emissão de dióxido de carbono, agente deletério responsável pela perda de proteção química oferecida pelo concreto ao aço. A proximidade com a linha férrea é um fator agravante já que o diesel, combustível utilizado neste modal, segundo Carvalho (2011), emite mais dióxido de carbono por unidade de volume ou peso de combustível se comparado a outros tipos de combustíveis utilizados em outros modais de transporte. Ademais, o diesel tem fator de emissão de cerca de 2,6 kg de CO₂ por litro de diesel queimado durante a combustão (CARVALHO, 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a inspeção da OAE, atestou-se o estado decrépto em que a estrutura está, principalmente relacionado a sua superestrutura, devido a falta de manutenção. Sobre a mesoestrutura, onde está presente os elementos de concreto armado, observa-se que os seis pilares analisados possuem trincas e necessitam de intervenção.

O pilar 1 está com uma abertura ao longo de uma de suas faces. Com o auxílio do fissurômetro, observou-se que trata-se de trinca com abertura de 0,8mm. A figura 21, abaixo, apresenta a análise da trinca no pilar.

Figura 21: Pilar 1 com Trinca de 0,5mm.



Fonte: Autores, 2023

Ademais, o pilar 1 também apresenta perda de parte de sua camada de cobrimento de concreto e com início de perda de seção no aço de sua armadura. Após asperção de fenolftaleína 1% alcoólica, percebeu-se que o líquido permaneceu incolor, ou seja, a estrutura está com pH 8,0, indicando a carbonatação do concreto no pilar 1 com deslocamento de concreto (figura 22). Portanto, a causa das trincas existentes nesse pilar é a despassivação do aço por carbonatação.

Figura 22: Pilar 1 – Carbonatação

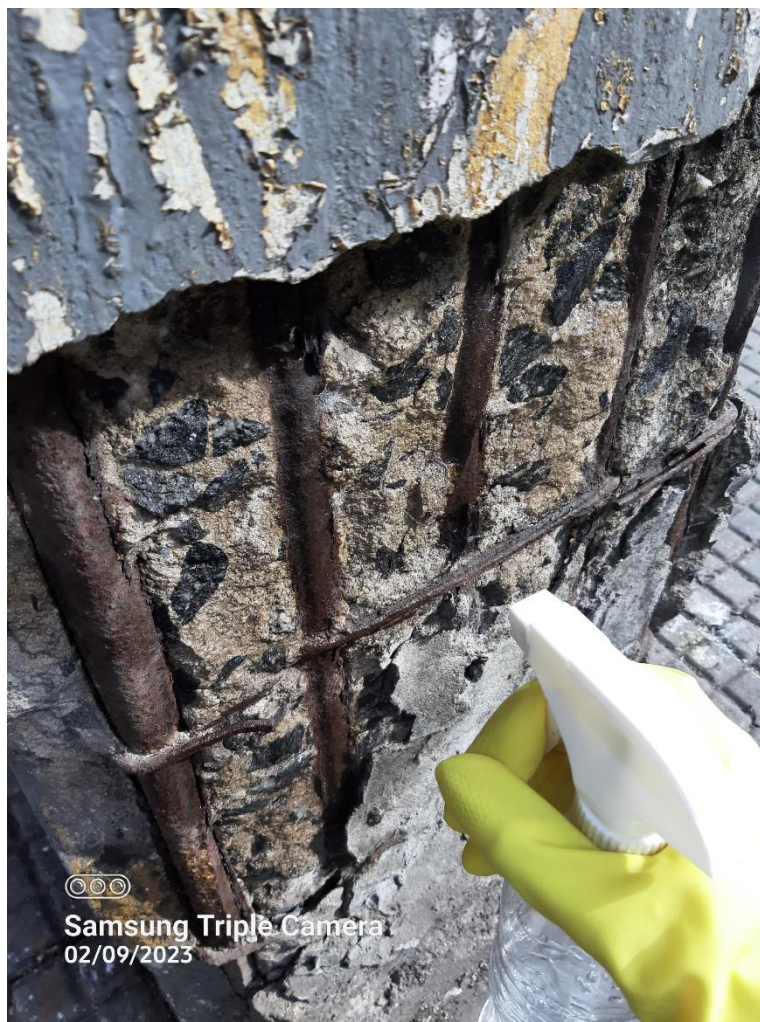


Fonte: Autores, 2023

A figura 23 representa o pilar 2 analisado. Este, diferente do pilar 1, está em estágio mais avançado de carbonatação devido a grande área com deslocamento. Isto resulta em maior área de exposição da armadura a mais dióxido de carbono e a outros agentes deletérios, acelerando ainda mais o processo de corrosão. Neste pilar, percebe-se também a errônea tentativa de recuperação da área com perda da

camada de cobrimento a partir do enmassamento com argamassa (parte inferior do pilar).

Figura 23: Pilar 2 – Carbonatação



Fonte: Autores, 2023

Outrossim, no pilar 2 observa-se trincas em suas outras faces (figura 24) ocasionadas por despassivação do aço devido a carbonatação. Isto se deve a perda de proteção química, pelo processo de carbonatação, do aço fornecida pelo concreto, acarretando na expansão da armadura em processo de corrosão que gerou tensões internas trativas. Esta expansão ocasionada pela formação de óxido ferroso gerou tensões internas de tração a qual o concreto não possui resistência suficiente. O mesmo ocorreu com o pilar 1. As trincas observadas no pilar 2 possuem aberturas de 0,85mm, 1,4mm, 1,6mm e 2,5mm.

Figura 24: Pilar 2 – Trinca por Carbonatação



Fonte: Autores, 2023

O pilar 3 apresenta aberturas de 0,9mm (figura 25), configurando-as em trincas. Pela configuração da trinca, conclui-se que ela tem por origem a despassivação do aço. Ou seja, devido as tensões trativas internas ao concreto originadas pela expansão do aço durante a sua corrosão, ocasionada pela perda de proteção do aço, fornecida quimicamente pelo concreto. Este pilar não apresenta despalcamento da camada de concreto.

Figura 25: Pilar 3 – Trinca por Despassivação do Aço

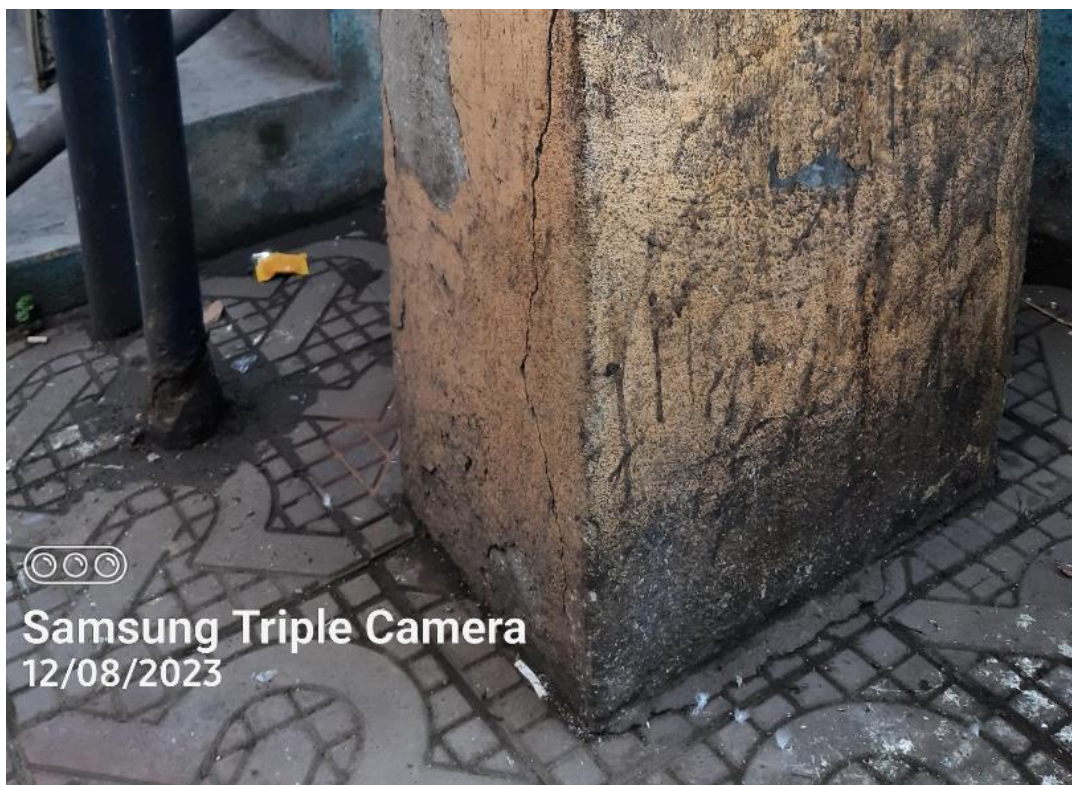


Fonte: Autores, 2023

Em análise do pilar 4, percebe-se que o mesmo foi submetido a um tratamento inadequado a fim de recuperá-lo de um deslocamento anterior. Como as causas desta anomalia não foram sanadas, a peça de concreto armado voltou a ser acometido por trincas desde sua base, como pode ser observado na figura 26.

Após a anamnese e etiologia deste pilar, analisando a configuração das trincas, conclui-se que sua causa é despassivação do aço, tendo por hipótese a carbonatação. Para confirmar esta hipótese, é necessário submeter o pilar ao teste destrutivo com fenolftaleína 1% alcoólica. Por se tratar da remoção de parte da camada de revestimento do concreto, não foi possível submeter o pilar a este teste para obter resultados para esse trabalho, já que, devido o impacto que é ocasionado, para este tipo de teste é necessário de autorização da prefeitura. O mesmo teste vale para o pilar 3.

Figura 26: Pilar 4 – Trinca por Despassivação do Aço



Fonte: Autores, 2023

No pilar 5, figura 27, observa-se que, através da diferença de acabamento entre a parte inferior e central da estrutura, também houve uma tentativa anterior de recuperação da zona de concreto deslocada assim como no pilar 4. A partir da anamnese do pilar, considerando sua localização, envolvido por camada de solo e a configuração da trinca (trinca vertical) conclui-se que a anomalia anterior ao tratamento inadequado é a etringita tardia. Portanto, a trinca originou-se a partir da expansão do concreto devido a DEF.

Figura 27: Pilar 5 – Trinca por Etringita Tardia



Fonte: Autores, 2023

O pilar 6, figura 28, está acometido por uma rachadura (abertura superior a 3mm) em sua parte inferior devido a formação de etringita tardia. A hipótese pode ser confirmada devido a configuração da trinca e do local em que o elemento está inserido. Este local, composto por solo, pode também ser encontrado no pilar 5.

O solo representa umidade e presença de matéria orgânica. A relação entre umidade e sulfato é um fator preponderante para a formação do mineral etringita posterior ao endurecimento do concreto. Matéria orgânica significa presença de dióxido de carbono, ou seja, agente deletério ao concreto. Outrossim, esses fatores, aliados as fissuras e trincas resultantes da expansão do concreto, também são agravantes a corrosão da armadura já que o concreto é um elemento poroso que permite a infiltração de água por meio da capilaridade e as trincas favorecem a entrada de mais agentes maléficis ao concreto e ao aço.

Figura 28: Pilar 6 – Rachadura por Etringita Tardia



Fonte: Autores, 2023

Em síntese, após as análises com fenolftaleína, concluiu-se que os pilares com perda de revestimento, 1 e 2, estão acometidos por carbonatação, já que o líquido aplicado permaneceu incolor. Concluiu-se também que esta também é a causa das trincas presentes ao longo do corpo desses pilares. Pela configuração das trincas existentes no pilar 3, concluiu-se que são ocasionadas por despassivação do aço. Como o pilar 3 está localizado próximo aos pilares 1 e 2, ou seja, sujeito às mesmas intempéries e agressividade ambiental, tem-se a carbonatação como principal causa da despassivação.

A partir da anamnese do pilar 4 e 5, conclui-se que o elemento foi submetido a tratamentos inadequados que, além de não sanarem a causa do deslocamento da camada de concreto anterior, originou uma trinca ao longo do corpo desse pilar. Ou seja, qualquer submissão de um elemento a um tratamento sem conhecimento das causas de tal manifestação patológica oferece o risco de reincidência da manifestação e da piora do estado do elemento.

Quando uma estrutura é submetida a um tratamento inadequado, ela pode ter reincidência das anomalias ou ter uma piora significativa do seu quadro. No caso do tratamento inadequado para o deslocamento que foi observado, emassamento das regiões de perda de cobertura, a corrosão do aço permanecerá acontecendo, já que a argamassa não oferece a proteção química adequada a armadura.

Tem-se como fator agravante a possibilidade que essa camada de argamassa não viesse a deslocar, mantendo a corrosão do aço desapercibida até que houvesse perda significativa de resistência do elemento, levando-o a colapso. Posto isto, a análise dos outros pilares em que não há armadura exposta torna-se tão importante, já que a corrosão de suas armaduras é extremamente provável pois estão acometidos por carbonatação (pilares 1 e 2), despassivação do aço (pilares 3 e 4) e etringita tardia (pilares 5 e 6).

Como todos os pilares analisados estão acometidos por trincas, a armadura de todos estão sujeitos a corrosão devido ao ciclo de despassivação do aço. Portanto, é de suma importância que haja o tratamento dessas aberturas tendo como objetivo principal sanar as patologias que originaram essa manifestação patológica. Isto é, não basta que seja aplicado mastique elástico, poliuretano, veda trincas, entre outros materiais, nas aberturas a fim de vedá-las e impedir a entrada de agentes deletérios ou umidade. É de suma importância que o tratamento das trincas comece pelo tratamento da carbonatação, da etringita tardia e da corrosão do aço, e, então, posteriormente, sejam aplicadas o vedante adequado a cada trinca, caso ainda seja necessário.

Posto a necessidade do tratamento contra carbonatação, além do teste de fenolftaleína 1% alcóolica já realizado nos pilares 1 e 2, é necessário submetê-los ao teste destrutivo a fim de averiguar a profundidade de carbonatação a qual eles foram acometidos. Apesar de não ter sido considerada a hipótese de carbonatação como causa original das trincas, também é importante submeter os pilares 5 e 6 a este tipo

de teste, considerando o baixo custo que o teste oferece. O mesmo teste deve ser aplicado aos pilares 3 e 4 para confirmar a sua carbonatação.

Entendendo-se que a desp passivação do aço ocorre por meio de um ciclo de degradação, não pode-se descartar a hipótese de carbonatação nos pilares 5 e 6 após a averiguação da formação de etringita tardia. Isso se deve a facilidade da entrada de dióxido de carbono na estrutura após a formação de trincas ao longo do corpo dos pilares após a expansão do concreto ocasionado pela DEF.

Para a realização dos testes destrutivos nos pilares 1 ao 6 é necessário seguir as seguintes recomendações:

- I. Realizar os testes de modo sucessivo e não de modo simultâneo;
- II. Realizar o escoramento das mísulas. As escoras devem ser devidamente calculadas para que suportem as cargas a quais serão solicitadas. Ademais, elas devem ser apoiadas em uma superfície regular, ou seja, não devem ser apoiadas diretamente no solo, a fim de que as tensões sejam distribuídas de forma mais uniforme;
- III. O teste destrutivo representa a retirada de parte da camada de cobrimento. Esse deslocamento deverá ser feito até que seja encontrado concreto são, ou seja, até que haja uma região em que a fenolftaleína aspergida fique rosa;
- IV. Verificar a perda de seção da armadura;
- V. Após a confirmação da carbonatação, realizar a recuperação do pilar;
- VI. Caso o concreto esteja são, recompor a camada destruída com argamassa ou com microconcreto de alta resistência, dependendo da profundidade de destruição;
- VII. Verificar a resistência do concreto são por meio de esclerometria;

Para recuperar o pilar carbonatado, indicado no item V, existem três métodos:

1. Realcalinização Química;
2. Realcalinização Eletroquímica;
3. Remoção do concreto carbonatado.

Devido o menor custo e a maior rapidez e facilidade de execução, o método 3 é o mais apropriado. Para realizá-lo, após a remoção do concreto “doente”, deverá ser feita análise da armadura, a fim de constatar possível corrosão do aço. Caso seja constatado perda de seção do aço, deve-se fazer o reforço das armaduras por encamisamento. Após o reforço, deverá ser realizado uma nova concretagem. Para isso, é necessário garantir a aderência entre o concreto antigo e o novo através de adesivos estruturais a base de epóxi.

Em seguida, montar a forma ao redor do pilar para que seja feita a concretagem. É necessário que a forma tenha uma abertura por onde o concreto será despejado. Por conseguinte, para facilitar o processo e evitar outras patologias, como pontos de desagregação do concreto, recomenda-se que o concreto seja autoadensável, com brita 0, ou que seja utilizado microconcreto de alta resistência.

Também é necessário realizar testes no solo a qual os pilares 5 e 6 estão alocados, a fim de identificar presença de Sulfatos e outros componentes deletérios ao concreto e ao aço.

Outros fatores identificados que contribuem para acelerar o processo de corrosão tanto nas estruturas metálicas quanto nas armadura das estruturas de concreto armado são:

- Urina humana;
- Alto índice de fezes e urina de pombo;
- Vegetação na estrutura (umidade).

5 CONCLUSÃO

A partir do estudo realizado por este trabalho, conclui-se, portanto, a importância do conhecimento dos métodos fornecidos pela Engenharia Diagnóstica e do conhecimento sobre as patologias das estruturas para que haja a manutenção correta dos elementos estruturais. Como pode ser observado na OAE analisada neste estudo, a estrutura foi submetida a tratamentos inadequados para o deslocamento das camadas de revestimento de concreto dos pilares analisados, demonstrando a falta de conhecimento sobre os tratamentos adequados para cada manifestação patológica.

Em suma, a OAE, passarela que transpõe a rodovia Lúcio Meira, o Parque Ferroviário da CSN e a avenida da Integração, no bairro aterrado, em Volta Redonda, classifica-se em estado sofrível, segundo DNIT (2004), isto é, os danos geraram insuficiência estrutural na passarela, porém ainda não há risco eminente de colapso. Portanto, a estrutura necessita de intervenção para que sejam realizadas manutenções ao longo de toda estrutura. A manutenção deve envolver além dos tratamentos já citados, a substituição dos elementos corroídos da superestrutura. Caso a OAE permaneça sem tratamento adequado, as manifestações patológicas se multiplicarão e as existentes se agravarão, podendo levar a perda de seu desempenho, deixando-a além de decrepita, obsoleta ou levá-la a colapso.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, Fernanda Wanderley Corrêa de. **Estudo da Repassivação da Armadura em Concretos Carbonatados Através da Técnica de Realcalinização Química**. 2009. 217 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-18122009-154958/publico/Tese_2009_Fernanda.pdf. Acesso em: 08 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto de Cimento Portland — Preparo, Controle, Recebimento E Aceitação — Procedimento**. ABNT NBR 12655: Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Edificações Habitacionais — Desempenho. Parte 2: Requisitos para os Sistemas Estruturais**. ABNT NBR 15575-2: Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Execução de Estruturas de Concreto – Procedimento**. ABNT NBR 14931: Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. ABNT NBR 6118: Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e Execução de Fundações – Procedimento**. ABNT NBR 6122: Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 1996.

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de. **Texto para Discussão: Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros**. Brasília: IPEA, 2011. 42 p. Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf. Acesso em: 24 set. 2023.

COELHO, Adenilson Roberto *et al.* Influência do choque térmico por resfriamento brusco do concreto após exposição a elevadas temperaturas em simulação de incêndio. **Revista Matéria**, Joinville, v. 25, n. 1, p. 1-12, abr. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0894>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/hQsPLLNXQwZggsRNRQX3TDB/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 07 out. 2023.

COLLEPARDI, M. A state-of-art review on delayed ettringite attack on concrete. *Cement and Concrete Composites*, nº25, p.401-407, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **010/2004 - PRO: Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido - Procedimento**. Rio de Janeiro: DNIT, 2004.

FTOOL: Two Dimensional Frame Analysis Tool. Version 4.00.04. Rio de Janeiro: Tecgraf/PUC-Rio, 2018. Disponível em: <<https://www.tecgraf.puc-rio.br/ftool/>>. Acesso em: 20 set. 2023

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. 1ª ed. São Paulo: PINI, 2008.

GOMIDE, F.L.T. **Manual de Engenharia Diagnóstica: Desempenho, Manifestações Patológicas e Perícias na Construção Civil**. 2. Ed. 2021.

GULLO, A.M. **Normas Técnicas Para Engenharia Diagnóstica em Edificações**. Edição padrão, 5 de outubro de 2009.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. São Paulo, 1993. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

HORKOSS, Sayed *et al.* **The effect of the source of cement SO 3 on the expansion of mortars**: Case Studies In Construction Materials, [S.L.], v. 4, p. 62-72, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2015.12.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221450951530019X>. Acesso em: 15 out. 2023.

JÂCOME, C.C.; MARTINS, J.G. **Reabilitação: Identificação e Tratamento de Patologias em Edifícios**. 1. ed. 2005.

JORGE, Marcello et al. **Ataque do concreto compactado com rolo por águas puras. Universidade Federal de Goiás, Brasil**, 2002.

MELO, Sandra Kurotusch de et al. **Estudo da Formação da Etringita Tardia em Concreto por Calor de Hidratação do Cimento**. 2010. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/4464>. Acesso em: 20 out.2023.

NANAYAKKARA; MAMEDE, Flavio; CARASEK, Helena; CASCUDO, Oswaldo. **IMPORTANCE OF CONTROLLING TEMPERATURE RISE DUE TO HEAT OF HYDRATION IN MASSIVE CONCRETE ELEMENTS**. 2011. 7 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, University Of Moratuwa, Moratuwa, 2022. Disponível em: https://ssms.jp/img/files/2019/04/sms11_5801.pdf. Acesso em: 20 out. 2023.

NETO, Egydio P. **Caderno de Receitas de Concreto Armado - Vol. 3 – Lajes - 1**. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2018.

OLIVEIRA, Thais Valadares. **Estudo da Lixiviação em Desenvolvimento no Concreto da Eclusa 1, Estrutura Componente do Sistema de Transposição da Barragem de Tucuruí**. Orientador: Marcelo Rassy Teixeira. 2016. xviii, 133 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Campus

Universitário de Tucuruí, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2016. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/handle/prefix/4389>. Acesso em: 20 de out. 2023

POULSEN, Ervin; MEJLBRO, Leif. **Diffusion of chloride in concrete: theory and application**. Londres e Nova York: Taylor & Francis, 2006. 442 p.

SANTOS, Guilherme Arruda. **Desenvolvimento de Sensores Eletroquímicos a Base de Ni e NiCo Eletrodepositados para Detecção de Processos de Fragilização por Hidrogênio**. 2011. 150 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais - Pipe, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/26121/dissertacao_VF.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 30 ago. 2023.

SILVA, Turibio José da. Mecanismo de transporte de massa no concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. v. I. Cap. 23. São Paulo: IBRACON, p. 809- 847, 2011.

SOARES, Arthur Pimentel Falcão; VASCONCELOS, Livia Tenório; NASCIMENTO, Felipe Bomfim Cavalcante do. **CORROSÃO EM ARMADURAS DE CONCRETO**. **Cadernos de Graduação**: Ciências exatas e tecnológicas, Maceió, v. 3, n. 1, p. 177-188, nov. 2015. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/fitsexatas/article/view/2651/1540>. Acesso em: 25 jul. 2023.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

SÜSSEKIND, José Carlos. **Curso de Concreto – Vol. 1 - Concreto Armado** – 6. ed. – São Paulo: Globo, 1989.

TORRES, I. F.; ANDRADE, T.. Risk analysis of the delayed ettringite formation in pile caps foundation in the metropolitan region of Recife - PE - Brasil. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 357-394, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952016000300003>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/zX5CrBchZQq8z8ZMSM3zzFG/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 out. 2023.

THOMAZ, Ercio. **Trincas em edifícios: Causas, Prevenção e Recuperação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

VERÇOZA, Ênio José. **Patologia das Edificações**. Porto Alegre: Sagra, 1991.