



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ – UFOPA
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ITAITUBA – CITB
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL – BEC**

PATRICK LUNA SILVA

**ANÁLISE DA SEGURANÇA ESTRUTURAL EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO
DE UMA EDIFICAÇÃO NO MUNICÍPIO DE ITAITUBA - PA**

**ITAITUBA - PA
2023**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ – UFOPA
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ITAITUBA – CITB
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL – BEC**

PATRICK LUNA SILVA

**ANÁLISE DA SEGURANÇA ESTRUTURAL EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO
DE UMA EDIFICAÇÃO NO MUNICÍPIO DE ITAITUBA - PA**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Oeste do Pará do Campus
Universitário de Itaituba.

Orientador: Me. Luamim Sales Tapajós.

**ITAITUBA - PA
2023**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP) Sistema Integrado
Bibliotecas – SIBI/UFOPA**

S586a Silva, Patrick Luna
Análise da segurança estrutural em vigas de concreto armado de uma edificação no município de Itaituba - PA / Patrick Luna Silva – Itaituba, 2023.
81 f.: il.

Orientador: Luamim Sales Tapajós
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Itaituba, Bacharelado em Engenharia Civil.

1. Estruturas. 2. Segurança. 3. Cisalhamento. 4. Estrutural. I. Tapajós, Luamim Sales, *orient.* II. Título.

CDD: 23 ed. 620.137

Bibliotecário-Documentalista: Ronne Clayton de Castro Gonçalves – CRB-2/1410

PATRICK LUNA SILVA

**ANÁLISE DA SEGURANÇA ESTRUTURAL EM VIGAS DE CONCRETO
ARMADO DE UMA EDIFICAÇÃO NO MUNICÍPIO DE ITAITUBA - PA**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Oeste do Pará do Campus
Universitário de Itaituba.

Conceito:

Data da Aprovação: ____/____/____

Me. Luamim Sales Tapajós - Orientador
Universidade Federal do Oeste do Pará

Esp. Andryo Henrique de Freitas
Universidade Federal do Oeste do Pará

Me. Allan Peralta Leiróz
Universidade Federal do Oeste do Pará



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ITAITUBA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao primeiro dia do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e três, às 14:30h, realizou-se na Sala 01 do Campus Universitário de Itaituba, a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Patrick Luna Lima**, intitulado, “**Análise da Segurança Estrutural em Vigas de Concreto Armado de Uma Edificação no Município de Itaituba-PA**”, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. Os trabalhos foram conduzidos pelo professor Luamim Sales Tapajós, orientador do discente e presidente da Banca Examinadora, constituída também, pelos membros convidados Professores Allan Peralta Leiroz e Andryo Henrique Freitas da Silva. Após apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso, a Banca Examinadora passou à arguição do discente. Encerrados os trabalhos de arguição, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre a apresentação e defesa oral do discente, considerando-o Aprovado com Nota: 8,9. Proclamados os resultados pelo presidente da Banca, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu Luamim Sales Tapajós, na qualidade de professor orientador do Trabalho de Conclusão de Curso avaliado, lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da Banca Examinadora.

Itaituba - PA, 01 de dezembro de 2023.

Presidente/orientador(a):

Luamim Sales Tapajós

Membro:

Andryo Henrique F. da Silva

Membro:

Allan Peralta Leiroz

Dedico aos meus pais, pela confiança e oportunidade de concretizar e encerrar essa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo caminho traçado até a minha escolha e pelo sustento diariamente, tanto físico quanto mental.

Aos meus pais por todo o esforço, prezando sempre pela minha educação, como também, o apoio nas minhas decisões e presença nos momentos difíceis, tornando esse caminho de conhecimento confortável e motivante.

A todos os professores e ao meu orientador Luamim, pelo apoio

A todos os meus colegas de curso, com quem partilhei momentos de grande alegria e trabalho, os meus mais sinceros agradecimentos.

João Carlos de Almeida

“O concreto armado é um material nobre que permite ao arquiteto e ao engenheiro realizar obras de grande beleza e funcionalidade.”

RESUMO

As estruturas em concreto armado no Brasil devem seguir as normatizações correspondentes de projeto, execução e desempenho, seguindo as diretrizes da NBR 6118 (2014), visando a segurança e conforto dos usuários, para se obter um bom uso da edificação. Quando surgem fissuras ou trincas em uma edificação, as mesmas devem ser analisadas, a fim de se verificar se essas patologias podem comprometer o estado limite de serviço ou estado limite último da estrutura. Este trabalho tem por objetivo analisar o desenvolvimento de fissuras típicas de flexão e cisalhamento em vigas de concreto armado em uma edificação utilizada por uma instituição educacional no município de Itaituba-PA, permitindo traçar um diagnóstico acerca da segurança estrutural da mesma, bem como os motivos que levaram ao surgimento de tais patologias. Para alcançar os objetivos propostos, foram realizadas visitas na edificação estudada, utilizando o esclerômetro e pacômetro, permitindo comparar se a execução da estrutura seguiu o que estava apresentado no projeto estrutural. Além disso, foram realizadas análises computacionais com o auxílio de softwares comerciais, possibilitando verificar se o projeto estrutural estava conforme as recomendações da NBR 6118 (2014). Com base nas análises realizadas, verificou-se que a execução acompanhou o que estava apresentado no projeto estrutural e o mesmo não atendia a diversos critérios estabelecidos pela norma brasileira, com a necessidade de uma intervenção para reforço da estrutura em concreto armado, a fim de garantir a segurança estrutural da edificação.

Palavra - Chave: Estruturas, Segurança, Cisalhamento e Estrutural.

ABSTRACT

The reinforced concrete structures in Brazil must follow the corresponding design, execution and performance standards, following the guidelines of NBR 6118 (2014), aiming at the safety and comfort of users, to obtain a good use of the building. When cracks or fissures appear in a building, they must be analyzed in order to verify if these pathologies can compromise the service limit state or ultimate limit state of the concrete structure. This paper aims to analyze the development of typical flexural and shear cracks in reinforced concrete beams in a building used by an educational institution in the city of Itaituba-PA, allowing a diagnosis about their structural safety, as well as the reasons that led to the emergence of such pathologies. To achieve the proposed objectives, visits were made to the building studied, using the sclerometer and pacometer, allowing comparison of whether the execution of the structure followed what was presented in the structural project. In addition, computational analyses were performed with the aid of commercial software, enabling to verify whether the structural design was in accordance with the recommendations of NBR 6118 (2014). Based on the analyses performed, it was verified that the execution followed what was presented in the structural project and that it did not meet several criteria established by the Brazilian standard, with the need for an intervention to reinforce the reinforced concrete structure in order to ensure the structural safety of the building.

Key - words: Structures, Safety, Shear and Structural.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Viga isostática submetida à flexão.....	16
Figura 2 - Fissuração típica em viga subarmada solicitada à flexão.	17
Figura 3 – Viga fissurada devido à torção.	19
Figura 4 - Exemplo de viga submetida ao esforço de torção.....	19
Figura 5 - Viga sem armadura transversal que alcançou a ruína no momento do aparecimento da primeira fissura inclinada.....	21
Figura 6 - Viga sem armadura transversal que resistiu algum tempo após o aparecimento da primeira fissura inclinada antes de romper.	21
Figura 7 - Ensaio de tração e compressão uniaxial.....	24
Figura 8 - Armadura de pele	33
Figura 9 - Fluxograma das etapas de avaliação.	36
Figura 10 - Mapa da Geolocalização da edificação.....	37
Figura 11 - Corte transversal da estrutura.....	37
Figura 12 - Vista superior do Campus.....	38
Figura 13 - Construção onde estão presentes as fissuras.....	38
Figura 14 - Planta baixa do Laboratório de informática.....	39
Figura 15 - Planta baixa das salas de aulas.....	39
Figura 16 - Planta baixa do auditório.	40
Figura 17 - Planta de forma do Pavimento superior.....	41
Figura 18 - Planta de forma da cobertura	41
Figura 19 - Viga V51 vão 1 laboratório de informática.	43
Figura 20 - Fissura na V51 vão 1 do auditório.	44
Figura 21 - Fissura na V51 Sala de informática.	45
Figura 22 - Localização das fissuras na V51 vão 1.	45
Figura 23 - Planta de forma da cobertura.	46
Figura 24 - Fissura na viga V51.	46
Figura 25 - Localização da fissura na viga V50.	47
Figura 26 - Fissura na V52 vão 1.....	47
Figura 27 - Localização da fissura na viga V52 vão 1.....	47
Figura 28 - Localização das fissuras na viga 52 – Vão 3, sala 8.	48
Figura 29 - Localização das fissuras na V52 – Vão 2.	49

Figura 30 - Localização das fissuras.....	49
Figura 31 – Fissura causadas por flexão na viga 52.	50
Figura 32 - Localização das fissuras na V52 sala 8.....	50
Figura 33 - Fissura na viga 52 próximos ao apoio, sala 9.	51
Figura 34 - Fissura na V52, sala 9.	51
Figura 35 - Localização das fissuras na V52 sala 9.....	52
Figura 36 - Fissura inclinada próximo ao apoio na V52 vão 4 do auditório.	52
Figura 37 - Fissura no centro da viga V52 Vão 4.....	53
Figura 38 - Fissura inclinada próximo ao apoio na viga V48 vão 5 do auditório.	53
Figura 39 - Localização das fissuras na V52 vão 4 e 5.....	54
Figura 40 - Fissuras na V55 vão 4.	54
Figura 41 - Localização das fissuras na V55 vão 4 e 5.....	54
Figura 42 - Gabarito de fissuras.....	56
Figura 43 - Medição de fissura, sala 8 viga V4 vão 4.	56
Figura 44 - Medição de fissura, viga V4 vão 3.....	57
Figura 45 - Medição de fissura, viga 52 vão 2.	57
Figura 47 - Limites para deslocamentos.	60
Figura 48 - Esclerômetro utilizado no ensaio de compressão superficial do concreto.	62
Figura 49 - Pacômetro para a detecção da posição do aço.	64
Figura 50 - Modelo tridimensional da estrutura produzido com um software de cálculo e detalhamento.	65
Figura 51 - Modelo tridimensional da estrutura produzido com um software de cálculo e detalhamento.	65
Figura 52 - Avisos mostrado pelo software mostrados após a análise para a V51.....	67
Figura 53 - Avisos mostrado pelo software mostrados após a análise para a V52.....	68
Figura 54 - Reforço parcial, em forma de cachimbo.	74
Figura 55 - Reforço com concreto projetado.	74
Figura 56 - Encamisamento por injeção de argamassa.....	75
Figura 57 - Encamisamento total.	75
Figura 58 - Posicionamento dos estribos e armaduras longitudinais.....	76
Figura 59 - Preparo de uma viga para a execução do reforço.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Patologias nas etapas do processo construtivo.	23
Tabela 2 - Valores estimados arredondados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto (considerando o uso de granito como agregado graúdo)	25
Tabela 3 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e	31
Tabela 4 - Exigências relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.....	58
Tabela 5 - Deslocamentos medidos, para as vigas do pavimento superior.....	61
Tabela 6 - Deslocamentos medidos, para as vigas da cobertura.....	61
Tabela 7 - Índice Esclerométrico para as Vigas 3 e 52.....	63
Tabela 8 - Carregamentos aplicados na estrutura.	66
Tabela 9 - Ações atuantes na estrutura.	66
Tabela 10 - Elementos não dimensionados na primeira análise.	67
Tabela 11 - Comparativo de armaduras das vigas do térreo.....	68
Tabela 12 - Comparativo de armaduras das vigas do térreo.....	69
Tabela 13 - Comparativo de vigas da cobertura.	70
Tabela 14 - Comparativo de vigas da cobertura.	71

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivo Geral	13
1.2	Objetivos Específicos.....	14
1.3	Organização do trabalho	14
2	JUSTIFICATIVA	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Principais tipos de fissuras e suas causas	16
3.1.1	Fissuração devido a flexão	16
3.1.2	Fissuração devido a torção	17
3.1.3	Fissuras devido ao cisalhamento	20
3.2	Patologias e erros de projeto e execução.....	21
3.3	Principais fatores que influenciam na fissuração em vigas de concreto armado ..	23
3.3.1	Módulo de elasticidade do concreto.....	23
3.3.2	Resistência do concreto a tração	26
3.3.3	Composição do concreto e métodos de execução	26
3.4	Processos para o controle de fissuração	30
3.4.1	Cobrimento mínimo.....	31
3.4.2	Armadura de pele.....	32
3.4.3	Armadura mínima.....	33
4	METODOLOGIA.....	35
4.1	Tipo de pesquisa	35
4.2	Descrição da edificação.	36
4.3	Procedimento de coleta e interpretação de dados.....	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
5.1	Identificação das patologias.....	43
5.2	Dimensão das fissuras	55
5.3	Deslocamentos.....	58
5.3.1	Resistência à compressão do concreto	61

5.4	Identificação das armaduras	63
5.5	Análise do projeto estrutural com um software de cálculo estrutural	64
6	PROPOSTA DE INTERVENÇÃO	72
6.1	Reforço estrutural.....	72
6.1.1	Aumento da seção de concreto/Encamisamento	72
6.1.2	Execução do reforço	73
6.1.3	Tipos de encamisamento com aumento de seção	73
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
	REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

Um dos problemas mais comuns encontrados em estruturas de concreto armado é o surgimento de fissuração excessiva, ocasionado por falhas no projeto, execução, recalques em fundações, materiais empregados, desforma incorreta, concretagem e baixa resistência do concreto, segundo Da Silva (2020) patologias são motivadas, geralmente, por falhas no planejamento que antecede a construção, similarmente, podem ocorrer na realização de uma ou várias tarefas durante o processo de execução da obra, ou em seguida, quando há o término da construção e entregue ao usuário, quando fora de controle, essas fissurações podem levar a estrutura a exceder os seus estados limites e levá-la ao colapso estrutural, podendo ocasionar danos irreparáveis aos seus usuários.

Segundo Vieira (2016), patologias ocorrem devido algum erro durante a execução destes elementos estruturais, ou seja, vigas, pilares ou lajes. Neville e Brooks (2013) destacam que pequenas fissuras interferem na vida útil das estruturas de concreto armado, facilitando a entrada de agentes ambientais agressivos, e entre eles a penetração de água e oxigênio, possibilitando o aparecimento da corrosão das armaduras.

Diante do aparecimento de fissuras em determinadas vigas da estrutura e da necessidade entender quais fatores contribuíram para o surgimento dessas patologias, é necessário fazer uma análise estrutural dos projetos e da estrutura construída.

Este trabalho tem o objetivo de fazer um estudo mais aprofundado sobre as principais causas dos problemas patológicos referentes as estruturas de concreto armado e a estrutura em análise. Será realizado uma pesquisa bibliográfica, modelagem do projeto estrutural da edificação com base no projeto estrutural, modelagem de outro modelo com alterações necessárias para ser feito o dimensionamento correto e obedecendo aos critérios da NBR 6118 (2014) e demais normatizações, ensaios tecnológicos para obter a resistência do concreto e análise dos resultados comparando os dois modelos para entender o que contribuiu para a ocorrência de patologias na edificação.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar os potenciais fatores que causaram o surgimento de fissuras nas vigas e realizar uma análise da segurança estrutural para verificar a capacidade de resistência desses elementos e os estados limites último e de serviço.

Visando atingir ao objetivo principal são necessários definir alguns objetivos específicos, sendo eles:

1.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar os motivos de surgimento das fissuras;
- Avaliar os resultados das análises para determinar a capacidade de suporte das vigas em relação aos estados limites últimos e de serviço;
- Elaborar um relatório com as conclusões e recomendações sobre a segurança e manutenção das vigas.

1.3 Organização do trabalho

O capítulo 2 trata da justificativa, são apresentados os motivos da elaboração da pesquisa, ressaltando a importância da realização do estudo devido aos diversos problemas que a fissuração pode causar caso não haja o tratamento adequado delas. Diante disso, são destacados os principais efeitos que a fissuração pode causar.

No capítulo 3 é feita uma revisão bibliográfica onde é apresentado os tipos mais comuns de fissuras em vigas de concreto armado, sendo relatado como ocorre esse tipo de patologia e quais as causas que geram esse tipo de fissura. Adiante é apresentado como as falhas na execução das estruturas de concreto armado contribuem com a manifestação de patologias na estrutura.

O capítulo 4 trata da metodologia que será seguida no projeto de pesquisa e sendo apresentados dados da edificação bem como os tipos de fissuras identificadas em uma análise preliminar do projeto de pesquisa, mostrando as formas que serão obtidas, as informações necessárias para a pesquisa, bem como as ferramentas necessárias e procedimentos que serão realizados para a obtenção dos resultados.

No capítulo 5 são apresentados os resultados e discussões acerca da pesquisa desenvolvida. No capítulo 6 é discutido como pode ser feito o reforço da estrutura, sobre os procedimentos e técnicas que serão empregadas, bem como os tipos de reforços que podem ser empregados.

2 JUSTIFICATIVA

Fissuras em estruturas de concreto armado são indesejáveis causando sérios prejuízos e gastos além do estimado no orçamento inicial feito junto ao projeto da estrutura, mesmo quando não oferecem nenhum tipo de risco, geram desconfiança e desconforto aos usuários. Segundo Sussekind (1985), fissuras causam efeitos psicológicos negativos, além de gastos prematuros desnecessários com reparos na estrutura que poderiam ser evitados.

Diante das manifestações patológicas encontradas na estrutura da edificação que será objeto de estudo deste trabalho, será necessário identificar quais as prováveis causas que originaram as fissuras, sendo este trabalho um ponto de partida para serem realizados trabalhos que possam realizar reparos, ou intervenções na estrutura a fim de garantir sua segurança. Com isso, poderá ser feita o reforço das vigas caso seja identificado perda na sua capacidade de suportar as cargas que atuam na estrutura.

É essencial a realização deste trabalho, visto que será avaliado a segurança da edificação quanto as patologias que surgiram ao longo de sua vida útil, servindo como referência para estudantes, pesquisadores e engenheiros que atuem na área de patologias, estruturas, e recuperação estrutural, possam tomar decisões a respeito com base em um trabalho que tratou sobre tema anteriormente. Sendo assim, utilizando decisões corretas e evitando gastos e intervenções desnecessárias nas estruturas que serão projetadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Principais tipos de fissuras e suas causas

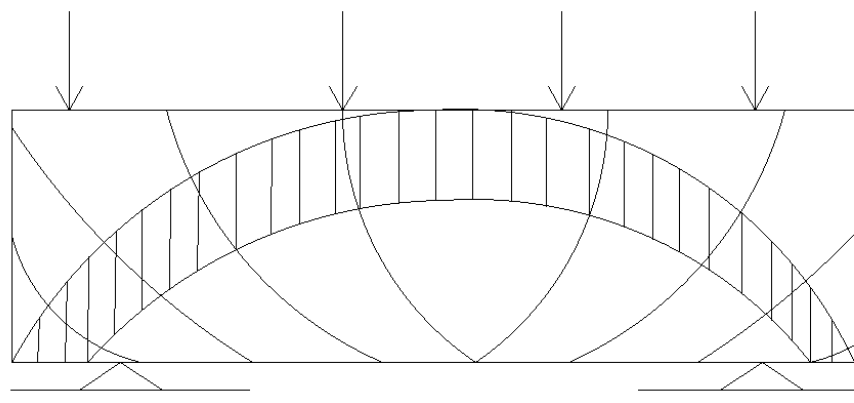
As estruturas de concreto armado são projetadas para resistir solicitações de esforços atuantes considerados durante a etapa de projeto, sendo sobrecargas que possam atuar sobre a estrutura, peso próprio, cargas acidentais e vento. No entanto, caso haja falha na execução, dimensionamento ou uma sobrecarga além do que foi prevista, pode ocorrer a manifestação de fissuras ao longo das vigas, pilares, lajes e alvenaria.

3.1.1 Fissuração devido a flexão

O processo de flexão em vigas é um fenômeno complexo que pode levar à fissuração, o que pode comprometer sua capacidade estrutural. De acordo com Beer e Johnston (2010), a flexão em vigas ocorre quando uma carga externa é aplicada perpendicularmente ao eixo longitudinal da viga.

Essa carga gera momentos de flexão que provocam deformações na viga, levando a uma curvatura no seu eixo longitudinal. A magnitude dessa curvatura depende da geometria da viga, das propriedades do material e da carga aplicada, quando uma viga é solicitada os esforços devido à flexão ocorrem conforme a figura 1.

Figura 1 - Viga isostática submetida à flexão

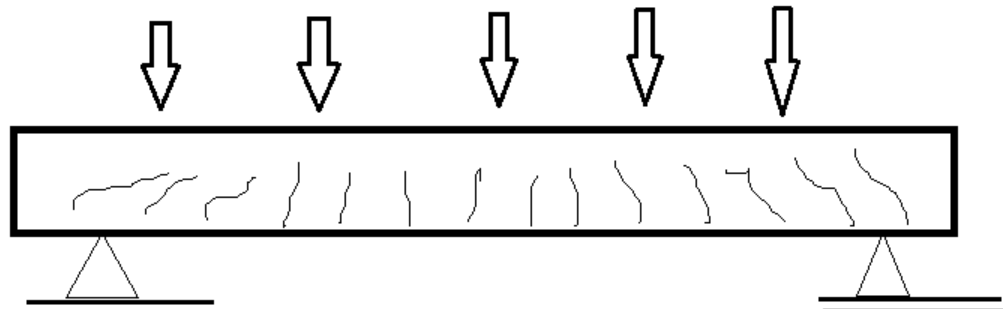


Fonte 1 – Elaborado pelo Autor.

As fissuras se desenvolvem perpendicularmente aos esforços de tração. Atuando na vertical a partir do terço médio do vão, sendo assim apresentam aberturas bem maiores na direção inferior da face da viga, onde estão localizadas as fibras mais tracionadas.

Sendo assim, as fissuras inclinam-se em um ângulo aproximado de 45° em relação ao eixo horizontal da viga. Em vigas com altura elevada essas fissuras aproximam-se de 60° conforme está apresentado na figura 2.

Figura 2 - Fissuração típica em viga subarmada solicitada à flexão.



Fonte 2 - Elaborado pelo autor.

Quando a carga aplicada é muito elevada ou a viga não foi projetada adequadamente, a deformação elástica pode ser excedida, resultando em deformação plástica ou até mesmo na ruptura da viga. Além disso, a fissuração pode ocorrer na viga devido ao aumento da tensão no concreto armado.

Segundo Araújo (2005), a fissuração pode ocorrer devido a dois mecanismos principais, tração direta e cisalhamento, a fissuração por tração direta ocorre quando as tensões de tração no concreto ultrapassam a sua resistência à tração, resultando em uma fissura perpendicular à direção da tensão. Já a fissuração por cisalhamento ocorre quando as tensões de cisalhamento ultrapassam a resistência do concreto, resultando em fissuras diagonais.

3.1.2 Fissuração devido a torção

A fissuração devido à torção em vigas de concreto armado ocorre por meio de dois mecanismos principais, cisalhamento e flexão. O cisalhamento ocorre quando as tensões tangenciais excedem a resistência do concreto à tração, a flexão ocorre quando as tensões normais excedem a resistência do concreto à compressão.

As fissuras de cisalhamento são geralmente diagonais em relação à seção transversal da viga, enquanto as fissuras de flexão são geralmente perpendiculares à seção transversal. As fissuras de cisalhamento ocorrem primeiro, seguidas pelas fissuras de flexão à medida que a torção é aumentada.

De acordo com WIGHT (2016), ao considerar o processo de fissuração causada por torção, é indispensável o uso de estribos e armaduras longitudinais para gerenciar a abertura e

o desenvolvimento das fissuras. Os estribos são elementos de confinamento que envolvem a seção transversal da estrutura, ajudando a restringir o alargamento das fissuras, são geralmente colocados perpendicularmente às armaduras longitudinais com a função de restringir o deslocamento lateral do concreto, aumentando sua resistência à tração e evitando a abertura excessiva das fissuras.

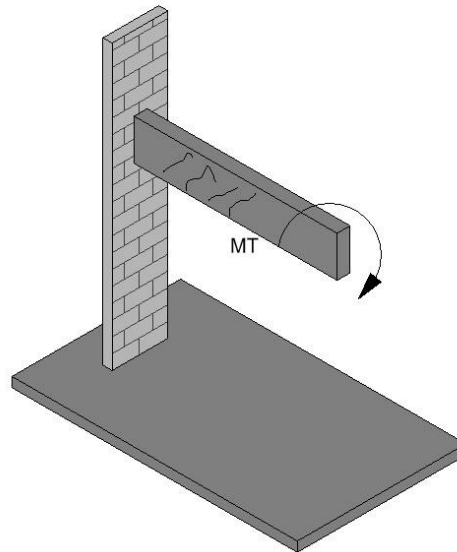
Vários fatores influenciam a fissuração devido à torção em vigas de concreto armado, entre os principais fatores estão a geometria da seção transversal da viga, a taxa de torção, a resistência à tração do concreto, a quantidade e distribuição do reforço de aço e a aderência entre o aço e o concreto. A geometria da seção transversal da viga é um fator importante na fissuração devido à torção, se a viga tiver uma seção transversal em forma de I, a tensão de cisalhamento será distribuída de maneira mais uniforme do que se a viga tiver uma seção transversal retangular.

A taxa de torção também é um fator importante, pois a fissuração aumenta à medida que a taxa de torção aumenta. A resistência à tração do concreto é outro fator importante, por determina a capacidade da viga de resistir às tensões de cisalhamento, a quantidade e distribuição do reforço de aço também são importantes, pois o aço aumenta a capacidade de carga da viga e reduz a largura das fissuras.

A torção é um tipo de carregamento que ocorre quando uma extremidade de uma estrutura é girada em relação à outra extremidade, esse carregamento produz um momento de torção na seção transversal da estrutura. A torção em vigas de concreto armado refere-se à deformação angular que ocorre ao longo do comprimento da viga devido à aplicação de torques ou momentos torcionais.

A figura 3 mostra uma viga engastada, na sua extremidade está atuando um momento de torção.

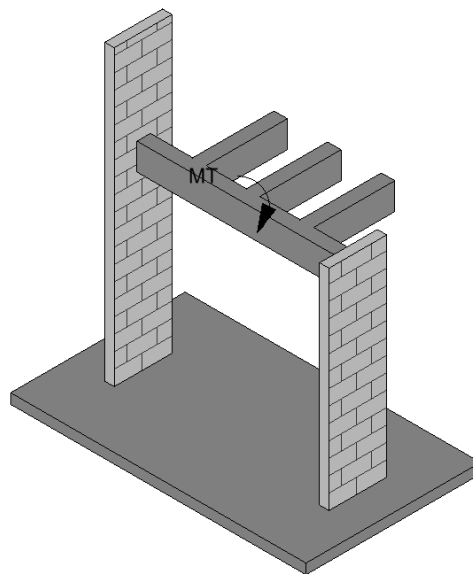
Figura 3 – Viga fissurada devido à torção.



Fonte 3 – Elaborado pelo autor.

O momento de torção é uma força rotacional que tende a girar a seção transversal da estrutura em torno de seu eixo longitudinal, a figura 4 é um exemplo de uma viga submetida ao esforço de torção onde a mesma serve de apoio para outras vigas, ocasionado torção em seu eixo.

Figura 4 - Exemplo de viga submetida ao esforço de torção.



Fonte 4 – Elaborado pelo autor.

Quando uma força de torção é aplicada em uma estrutura, as fibras da seção transversal da estrutura experimentam uma deformação angular. As fibras na superfície externa da estrutura se esticam, enquanto as fibras na superfície interna se comprimem.

O ponto neutro é o ponto da seção transversal que não sofre deformação angular durante o carregamento de torção. Ele é localizado no eixo longitudinal da seção transversal e a partir dele, a deformação angular cresce linearmente até as superfícies externas da estrutura.

O momento de torção é transmitido ao longo da seção transversal da estrutura através da aderência entre o concreto e o aço de reforço. O aço de reforço é colocado em uma posição estratégica para resistir às tensões de torção na estrutura, é projetado para absorver as tensões de cisalhamento que ocorrem na seção transversal da estrutura durante o carregamento de torção, sendo responsável por aumentar a capacidade de carga e a resistência da estrutura à torção.

A quantidade e a distribuição do aço de reforço são importantes para a resistência à torção da estrutura. Quando o aço de reforço é inadequado ou mal distribuído na seção transversal da estrutura, as tensões de torção não são distribuídas uniformemente na seção transversal, isso pode levar a uma concentração de tensões em uma determinada região da estrutura, o que pode levar à fissuração e eventual falha.

3.1.3 Fissuras devido ao cisalhamento

De acordo com Oliveira (2012), fissuras, trincas e rachaduras são manifestações patológicas que surgem quando o material é solicitado por um esforço maior do que ele pode atender de forma íntegra, ocasionando uma abertura, conforme a sua espessura será classificado como fissura, trinca e rachadura.

Como diz Rush (1981) as fissuras de cisalhamento em vigas de seções retangulares podem surgir a partir de fissuras de flexão. Nestes casos, estas fissuras de flexão, logo que surgem, desencadeiam uma redistribuição considerável de tensões internas que irão influenciar na inclinação das fissuras de cisalhamento.

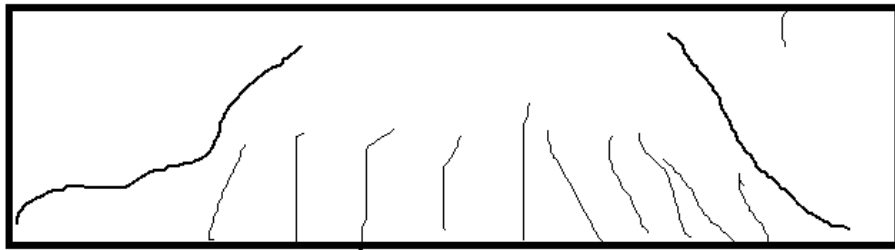
Hanson (1958) afirma que as vigas sem a armadura de cisalhamento adequada alcançam a ruína logo após o aparecimento da primeira fissura inclinada. Porém, isto não é uma regra, visto que em seus estudos algumas vigas, até mesmo sem armadura transversal, apresentaram certa resistência mesmo após o aparecimento da primeira fissura inclinada, o que pode ser visto na Figura 5 e 6.

Figura 5 - Viga sem armadura transversal que alcançou a ruína no momento do aparecimento da primeira fissura inclinada.



Fonte 5 – Elaborado pelo autor.

Figura 6 - Viga sem armadura transversal que resistiu algum tempo após o aparecimento da primeira fissura inclinada antes de romper.



Fonte 6 – Elaborado pelo Autor.

Em geral, no dimensionamento de vigas de concreto armado, a flexão é considerada antes do cisalhamento, obtendo-se, assim, as dimensões da seção e a disposição da armadura para fornecer resistência de momento necessária. Limites são colocados na quantidade de armadura de flexão para que, se houver ruptura, ela se acumule gradualmente, fornecendo bastante aviso aos ocupantes do local.

A viga é então dimensionada para resistir ao esforço cortante, com a resistência ao cisalhamento maior ou igual à resistência à flexão, pois a ruptura por cisalhamento é rápida e frágil. Quando a armadura de cisalhamento é insuficiente, pode ocorrer o escoamento, provocando a fissuração da viga (fissuras inclinadas), se estendendo até a região comprimida do concreto.

3.2 Patologias e erros de projeto e execução

Um dos principais problemas encontrados com grande frequência nas edificações são patologias nas estruturas de concreto, ocasionados por diversos fatores devido a falhas na

execução. Essas falhas se não corrigidas podem ocasionar grandes prejuízos irreversíveis do ponto de vista material e humano.

De acordo com Arivabene (2015), o ritmo acelerado com que a construção civil vem crescendo provoca o surgimento de novas técnicas construtivas, novos métodos de cálculos e diversas outras inovações, trazendo consigo, implicitamente, a aceitação de novos riscos. O que por sua vez exige mais conhecimento sobre materiais e estruturas que por muitas vezes deixa lacunas para que ocorram deterioração precoce e acidentes.

Ainda segundo Arivabene (2015), alguns dos fatores que podem contribuir para a deterioração estrutural de uma edificação são, dentre outros:

- Projetos inadequados (deficiência no cálculo da estrutura, avaliação da resistência do solo, etc.);
- Falta de compatibilidade entre o projeto estrutural e o arquitetônico, bem como os outros projetos da obra;
- Especificação inadequada de materiais;
- Detalhamento insuficiente ou errado;
- Detalhes construtivos inexecutáveis;
- Erros de dimensionamento.

Durante a etapa de execução da estrutura, os principais fatores contribuintes são:

- Deficiências de concretagem, transporte, lançamento, adensamento, cura;
- Escoramentos e formas inadequadas;
- Deficiência nas armaduras: estribos, ancoragem, emendas, cobrimento, espaçamento, posicionamento;
- Má utilização dos materiais de construção: Fck inferior ao especificado, aço diferente do especificado, utilização inadequada de aditivos, traço inadequado do concreto;
- Inexistência de controle de qualidade.

Arivabene (2015) nos mostra que vários estudos apontam para a fase do projeto de estrutura como a mais comprometida por erros que causam problemas patológicos nas mesmas. Falhas que geralmente são mais graves que as cometidas em relação à qualidade dos materiais e/ou aos métodos construtivos. Muitas vezes por falta de investimento do proprietário, seja público ou privado, em projetos mais elaborados, buscando sempre a solução mais simples e barata.

A tabela 1 abaixo mostra os percentuais das causas das manifestações patológicas em uma edificação.

Tabela 1 - Patologias nas etapas do processo construtivo.

Etapa	Percentual
Projeto	40%
Execução	28%
Materiais	18%
Uso	10%
Planejamento	4%

Fonte 7 - Arivabene (2015).

Segundo Amorim (2010), existem duas observações importantes a serem feitas sobre a execução. Relacionada à sequência natural do processo construtivo, que determina que a etapa de execução só deve ser iniciada após a conclusão da etapa de concepção do projeto.

Embora essa fosse a sequência correta a ser seguida, é raro que ocorra em obras de grande porte, sendo comum a prática de fazer adaptações ou modificações no projeto durante a execução da obra, sob o pretexto, de que são necessárias simplificações construtivas. Geralmente tais alterações acabam contribuindo para a ocorrência de erros.

Segundo Bauer (2004), ao dar início a uma construção, é possível ocorrer uma variedade de falhas e erros diferentes. Por exemplo, pode haver falta de boas condições no local de trabalho, ausência de mão de obra devidamente capacitada, falta de fiscalização no controle de qualidade da execução, utilização de materiais de qualidade inferior, negligência técnica, esses são apenas alguns dos desafios que podem surgir ao longo do processo construtivo.

3.3 Principais fatores que influenciam na fissuração em vigas de concreto armado

A fissuração do concreto é um problema comum que pode afetar a durabilidade e a segurança das estruturas. Vários fatores podem contribuir para a fissuração, incluindo reação álcali-agregado, retração, cargas excessivas, temperatura, falta de armadura, falta de cura adequada e problemas de projeto

3.3.1 Módulo de elasticidade do concreto

Woodson (2012) discute a importância do módulo de elasticidade do concreto no contexto da fissuração excessiva, ele enfatiza que a rigidez do concreto, expressa pelo módulo de elasticidade, influencia diretamente na capacidade do material de suportar deformações e

distribuir as tensões ao longo da estrutura. Um módulo de elasticidade baixo pode resultar em maiores concentrações de tensões e deformações excessivas, levando ao surgimento de fissuras.

O módulo de elasticidade do concreto é uma propriedade fundamental do material com uma relação direta com a capacidade de suportar cargas estruturais. O módulo de elasticidade é definido como a relação entre o esforço aplicado e a deformação resultante do material, no limite elástico, em outras palavras, é a medida da rigidez do material, ou seja, a capacidade de resistir à deformação sob carga.

O módulo de elasticidade do concreto é influenciado por diversos fatores, incluindo a idade do concreto, a relação água/cimento, a temperatura, a umidade e a presença de aditivos. Além disso, o tipo de agregado utilizado na mistura de concreto pode afetar o módulo de elasticidade, em geral, o módulo de elasticidade do concreto é maior quando são utilizados agregados mais rígidos, como o granito, em comparação com agregados menos rígidos, como a areia.

Existem diversas técnicas para medir o módulo de elasticidade do concreto. Uma das mais comuns é o ensaio de compressão uniaxial, no qual um cilindro de concreto é submetido a uma carga compressiva e a deformação resultante é medida.

Na figura 7, pode ser observado um ensaio de tração e compressão uniaxial sendo realizado.

Figura 7 - Ensaio de tração e compressão uniaxial



Fonte 8 – Araújo (2021).

Outra técnica é o ensaio de ultrassom, no qual ondas sonoras são enviadas através do concreto e o tempo de trânsito é medido para determinar a velocidade de propagação da onda, diretamente relacionada ao módulo de elasticidade.

Segundo Neville (2013), o módulo de elasticidade do concreto varia normalmente de 30 a 50 GPa (Gigapascals) para concretos de alta resistência, dependendo da idade do concreto e da relação água/cimento. Conforme NBR 6118/2014, que estabelece os requisitos para projeto e execução de estruturas de concreto, o módulo de elasticidade do concreto deve ser determinado em função da idade e do tipo de cimento utilizado na mistura.

Segundo o item 8.2.8 da NBR 6118/2014, o módulo de elasticidade inicial do concreto (E_{ci}) é dado pela seguinte expressão, onde f_c e E_{ci} estão na unidade Mpa quando não forem realizados ensaios.

$$E_{ci} = 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \text{ para } F_{ck} \text{ de } 20 \text{ Mpa a } 50 \text{ Mpa}$$

Para os elementos estruturais em serviço, é adotado o módulo de elasticidade secante, multiplicando-se o módulo de elasticidade tangente por 0,85:

$$E_{cs} = 4700 \times \sqrt{f_{ck}} \tag{1}$$

A tabela 2 correlaciona os valores estimados do módulo de elasticidade de acordo com a resistência característica à compressão.

Tabela 2 - Valores estimados arredondados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto (considerando o uso de granito como agregado graúdo)

Classe de Resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
E_{ci} (GPa)	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
E_{cs} (GPa)	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47
ai	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,93	0,95	0,98	1,00	1,00

Fonte 9 - ABNT NBR 6118 (2014).

O conhecimento preciso do módulo de elasticidade do concreto é fundamental para o projeto de estruturas, à ajuda a prever as deformações elásticas e a resistência a cargas. Além

disso, o módulo de elasticidade também é utilizado em simulações numéricas para análise de desempenho de estruturas, otimização de projetos e para avaliação de possíveis patologias.

3.3.2 Resistência do concreto a tração

A resistência à tração do concreto é um dos parâmetros mais utilizado na avaliação de sua qualidade e durabilidade. O concreto é um material que apresenta alta resistência à compressão, mas baixa resistência à tração, o que pode resultar em fissuras e rachaduras que afetam sua integridade estrutural, sendo assim geralmente não se considera a resistência a tração do concreto no dimensionamento.

De acordo com Neville (2013), a resistência à tração do concreto é afetada por diversos fatores, incluindo a relação água/cimento, a cura do concreto, a presença de agregados de diferentes tamanhos e a idade do material. Além disso, a resistência à tração do concreto é influenciada pelo tipo de ensaio utilizado para medir essa propriedade.

3.3.3 Composição do concreto e métodos de execução

3.3.3.1 Agregados

Os agregados são materiais granulares, como areia e pedra britada, utilizados na produção de concreto. Eles são responsáveis por cerca de 75% a 80% do volume do concreto e influenciam diretamente a sua resistência e durabilidade.

A qualidade dos agregados utilizados na produção do concreto é fundamental para a sua resistência. Segundo Monteiro (2018), a resistência do concreto é afetada pela forma, textura, tamanho, distribuição granulométrica e qualidade superficial dos agregados, por isso, é importante que os agregados atendam às especificações técnicas de qualidade e sejam selecionados conforme as exigências do projeto.

A presença de agregados mal dimensionados ou com elevado teor de impurezas pode afetar significativamente a resistência do concreto. A falta de uniformidade dos agregados pode causar vazios na estrutura do concreto, comprometendo a sua resistência, já a presença de impurezas pode afetar a aderência entre o cimento e os agregados, diminuindo a sua resistência mecânica.

Além disso, a porosidade dos agregados também é um fator que influencia a resistência do concreto. De acordo com Neville (2003), agregados porosos podem absorver a água do concreto e diminuir a sua resistência, especialmente em ambientes úmidos ou em contato com substâncias agressivas.

Os agregados também podem ter um papel importante na fissuração do concreto. Segundo Monteiro (2018), a forma e a textura dos agregados podem influenciar a aderência entre o cimento e os agregados, o que pode afetar a resistência à tração do concreto e aumentar a probabilidade de fissuras.

3.3.3.2 Relação Água/Cimento

A relação água/cimento é um dos fatores mais importantes para a resistência do concreto. O concreto é composto principalmente por cimento, agregados e água, sendo que a água é responsável pela hidratação do cimento, resultando na formação de um gel que une os componentes do concreto.

A relação água/cimento é a quantidade de água em relação à quantidade de cimento utilizada na mistura é expressa em volume ou peso é uma medida da quantidade de água necessária para hidratar completamente o cimento. Quanto maior for a relação água/cimento, maior será a quantidade de água na mistura, o que pode resultar em uma menor resistência do concreto.

Isso acontece porque o excesso de água pode causar uma série de problemas, como a redução da resistência mecânica, aumento da permeabilidade, maior suscetibilidade à fissuração e menor durabilidade. Além disso, o excesso de água pode causar a segregação dos materiais, comprometendo a homogeneidade e a uniformidade da mistura.

Por outro lado, uma relação água/cimento adequada pode resultar em um concreto mais resistente e durável. A relação ideal depende de diversos fatores, como o tipo de cimento, as características dos agregados, a finalidade da estrutura e as condições de cura, recomenda-se uma relação água/cimento de 0,4 a 0,6 para concretos de alta resistência.

3.3.3.3 Métodos de execução

A execução de estruturas de concreto armado é um processo complexo e crucial para a segurança das edificações. Além da importância da moldagem in loco para a personalização das estruturas, é fundamental serem adotados métodos de execução que garantam a qualidade e prevenção de patologias.

A qualidade na execução de estruturas de concreto armado é fundamental para a segurança da edificação e prevenção de patologias. Segundo Souto (2012), a falta de controle na execução pode resultar em patologias como fissuras, deslocamentos, trincas e até mesmo colapso da estrutura.

De acordo com Ferreira (2012), a dosagem correta do concreto é fundamental para garantir a resistência e a durabilidade da estrutura, enquanto o correto adensamento é importante para garantir a homogeneidade do concreto e evitar vazios.

A prevenção de patologias é essencial para garantir a segurança e a durabilidade da estrutura. Segundo Silva (2010), a prevenção de patologias deve ser considerada desde o projeto da estrutura até a sua execução, incluindo o controle da qualidade do concreto e o acompanhamento da evolução das patologias ao longo do tempo.

Para prevenir patologias, é importante que sejam adotados métodos de execução adequados, como a dosagem correta do concreto, a escolha dos materiais de qualidade, a utilização de formas adequadas e a compactação adequada. Além disso, é importante realizar ensaios e testes ao longo do processo de execução para garantir a qualidade da estrutura.

3.3.3.4 Cura do concreto

A cura adequada do concreto é essencial para garantir a sua resistência e durabilidade. Segundo Neville (2003), a cura do concreto é necessária para permitir que o cimento reaja com a água e forme a matriz sólida que dá resistência ao material. Além disso, a cura adequada do concreto pode reduzir a necessidade de reparos e manutenção.

Existem diversas técnicas de cura, como a cura úmida, a cura com produtos químicos e a cura térmica, que devem ser escolhidas de acordo com as condições de clima, tipo de cimento e aplicação do concreto. Lima (2009) destaca que a cura úmida é a técnica mais comum e eficaz, ao manter a umidade necessária para a hidratação do cimento, já a cura térmica, de acordo com Andrade (2001), é indicada para condições de baixa temperatura, acelerando o processo de cura e aumentando a resistência do concreto.

A falta de cura adequada pode resultar em fissuras no concreto, comprometendo a sua capacidade estrutural e estética. Vargas e Santana (2012) ressaltam que as fissuras podem ser causadas por diversos fatores, como a retração do concreto durante a secagem, o calor excessivo durante o processo de cura, a falta de umidade ou a presença de tensões na estrutura.

3.3.3.5 Métodos para lançamento e adensamento do concreto

O lançamento e adensamento do concreto são etapas importantes na produção e podem influenciar diretamente na sua resistência e durabilidade. No entanto, se não forem realizados adequadamente, podem contribuir para a fissuração do concreto, o método de lançamento do concreto pode afetar a sua qualidade e a probabilidade de fissuração.

Segundo Dias e Helene (2012), o lançamento do concreto por meio de elevação direta pode causar segregação dos seus componentes e a formação de vazios, aumentando a probabilidade de fissuras. Por isso, é recomendado o uso de bombas de concreto para o lançamento, que garantem uma distribuição mais homogênea do material.

Durante o lançamento, é fundamental garantir que o concreto seja distribuído de forma homogênea e uniforme, isso pode ser feito através da utilização de equipamentos específicos, como a bomba de concreto, que permite um alcance maior e um controle mais preciso do fluxo de concreto. É importante que a bomba seja acionada suavemente, para evitar o acúmulo de pressão e a formação de bolsões de ar ou vazios.

O processo de lançamento do concreto é uma etapa crucial na construção de qualquer estrutura, e requer cuidados específicos para evitar problemas como fissuras na estrutura. Para isso, é importante seguir algumas recomendações e tomar cuidados durante o processo de lançamento.

O primeiro passo é garantir que a superfície onde o concreto será lançado esteja limpa e livre de detritos, como pedras e objetos que prejudiquem o processo. Outro fator importante é a qualidade do concreto, é essencial que ele esteja nas especificações do projeto, com as quantidades corretas de água, cimento e agregados o uso de aditivos também pode ajudar a melhorar a trabalhabilidade e reduzir a possibilidade de fissuras.

O adensamento do concreto é outra etapa importante e pode influenciar na sua resistência e durabilidade, segundo Mehta e Monteiro (2008), o adensamento inadequado pode deixar vazios na estrutura do concreto, comprometendo a sua resistência e aumentando a probabilidade de fissuras. Por isso, é importante utilizar equipamentos de adensamento adequados e realizar essa etapa de forma cuidadosa e bem distribuída.

No adensamento do concreto é necessário que ele seja compactado de forma adequada, evitando a formação de vazios e a concentração de tensões, que podem levar à fissuração. O adensamento pode ser feito com equipamentos vibratórios ou manuais, dependendo da área e do tipo de estrutura.

Além disso, é importante mencionar que a presença de armaduras mal posicionadas ou inadequadas também pode contribuir para a fissuração do concreto. A falta de aderência entre o aço e o concreto pode levar a tensões excessivas nas regiões próximas às armaduras, aumentando a probabilidade de fissuras.

3.3.3.6 Retração

A retração do concreto é um processo natural que ocorre durante a secagem da mistura de cimento, água, agregados e aditivos. Esse processo resulta na redução do volume do concreto, o que pode levar à fissuração se não for controlado adequadamente.

De acordo com Mehta e Monteiro (2006), a retração do concreto é um fenômeno complexo e depende de vários fatores, incluindo a proporção dos materiais, a quantidade de água utilizada, as condições de cura e a temperatura ambiente.

A fissuração é um efeito colateral comum da retração do concreto e pode ser causada por vários fatores, como a falta de controle da retração, a falta de armadura ou o uso de agregados inadequados. De acordo com Neville (2011), as fissuras podem ter efeitos negativos na durabilidade e na resistência do concreto, além de afetar a estética da estrutura.

Para minimizar a retração e evitar a fissuração do concreto, é importante utilizar técnicas de controle da retração, como a utilização de aditivos redutores de retração, a cura úmida do concreto e o uso de armadura de retração. De acordo com ACI Committee 224 (1998), o uso de aditivos redutores de retração pode reduzir significativamente a fissuração e aumentar a durabilidade do concreto.

Além disso, a seleção de materiais de qualidade e adequados para a aplicação desejada é fundamental para minimizar a retração e evitar a fissuração. Segundo Mindess, Young e Darwin (2003), a escolha de agregados adequados e a utilização de cimento de alta qualidade podem ajudar a minimizar a retração e evitar a fissuração do concreto.

3.4 Processos para o controle de fissuração

Segundo Caldas (1997) existem três razões para se controlar a fissuração, a durabilidade afetada diretamente pela corrosão das armaduras, a aparência e a estanqueidade a líquidos e gases. A corrosão das armaduras causa fissuras transversais que expõem as armaduras, sendo que essas fissuras acima 0,3 mm estão acima do permitido pela NBR 6118/2014.

Para controlar a fissuração em vigas de concreto, é necessário adotar medidas preventivas desde o projeto até a execução da estrutura. Uma das principais medidas é o dimensionamento adequado da viga, considerando as cargas a serem suportadas e as propriedades mecânicas do concreto, é importante garantir a correta posição e espaçamento das armaduras, para que elas possam desempenhar seu papel adequadamente.

Durante a execução da viga, é importante garantir a qualidade do concreto, evitando a presença de vazios e falhas que comprometam a resistência e a durabilidade da estrutura.

Também é importante garantir a correta cura do concreto, para evitar a formação de fissuras por retração hidráulica.

Após a execução da viga, é importante realizar inspeções regulares para identificar eventuais fissuras e avaliar sua evolução. Quando necessário, é preciso adotar medidas de reparo e reforço para garantir a segurança e a durabilidade da estrutura.

3.4.1 Cobrimento mínimo

O cobrimento mínimo de vigas de concreto armado é um aspecto fundamental a ser considerado no processo de projeto e construção de estruturas de concreto. Esse parâmetro define a distância mínima entre a superfície do aço e a face mais próxima do concreto, garantindo a proteção adequada da armadura contra a corrosão e proporcionando maior durabilidade e segurança à estrutura.

De acordo com as normas NBR 6118 (2014) e NBR 14931 (2004), o cobrimento mínimo de vigas de concreto armado deve ser de 2,5 cm para ambientes internos e de 3,5 cm para ambientes externos. Além disso, é importante considerar as condições ambientais, o tipo de agressividade a que a estrutura estará exposta e a classe do concreto utilizado.

A tabela 3 define o cobrimento mínimo para vigas, lajes e pilares de acordo com a classe de agressividade ambiental.

Tabela 3 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ³⁾
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

¹⁾ Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

²⁾ Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

³⁾ Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte 10 - NBR 6118 (2014)

Segundo Monteiro (2018), a escolha do cobrimento mínimo adequado deve ser baseada em estudos técnicos e deve considerar aspectos como a qualidade dos materiais, as condições de exposição e a durabilidade da estrutura. O autor ainda destaca que o cobrimento mínimo

deve ser verificado durante a execução da obra, por meio de inspeções visuais e com a utilização de espaçadores para garantir que as armaduras não mudem de posição durante a concretagem.

Outro aspecto importante a ser considerado é o controle da qualidade dos materiais utilizados na construção da estrutura, como destaca Dantas (2017). O autor ressalta que a qualidade do concreto e do aço utilizados é fundamental para garantir a proteção adequada da armadura e a durabilidade da estrutura.

O cobrimento mínimo das vigas de concreto armado não deve ser negligenciado durante o processo de projeto e construção da estrutura. A sua escolha adequada e a verificação constante durante a execução da obra são fundamentais para garantir a segurança, a durabilidade e a qualidade da estrutura.

3.4.2 Armadura de pele

A armadura de pele é uma técnica utilizada em vigas de concreto armado para combater a fissuração, que consiste na inserção de uma armadura longitudinal adicional próxima à face tracionada da viga. Essa armadura é dimensionada para resistir às tensões de tração que surgem no concreto.

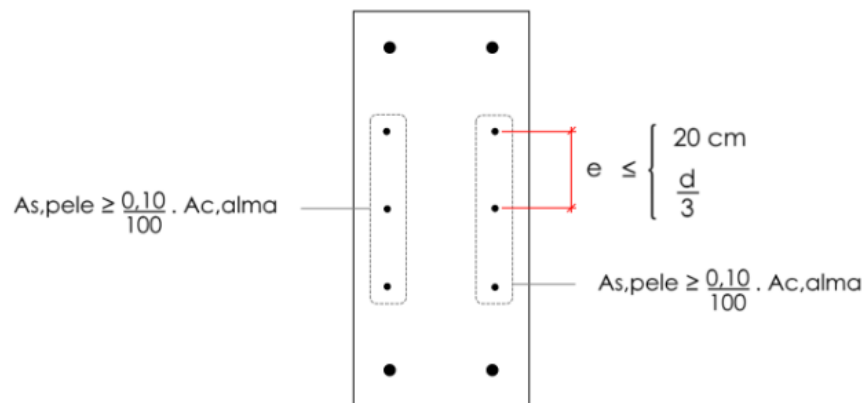
As fissuras são um dos problemas mais comuns em estruturas de concreto armado, elas ocorrem devido à baixa capacidade de resistência do concreto à tensão de tração, em comparação com a tensão de compressão. Quando a tensão de tração ultrapassa a capacidade de resistência do concreto, surgem as fissuras, que podem comprometer a durabilidade e a segurança da estrutura.

A armadura de pele consegue de reduzir a largura das fissuras em vigas de concreto armado, pois ela redistribui as tensões de tração no concreto, evitando que a tensão ultrapasse a capacidade de resistência do material. Além disso, a armadura de pele também pode aumentar a capacidade de carga da viga, pois a redistribuição das tensões de tração torna a estrutura mais resistente.

Em cada lateral da viga, será inserida uma armadura de pele cuja área deve ser de no mínimo 0,10% da área da alma de concreto A_c , alma, mas não é necessário que essa armadura seja superior a 5 cm²/m por face. Ao calcular a armadura de pele, não se deve levar em conta as áreas das armaduras principais de tração e compressão.

Os espaçamentos entre as barras da armadura de pele não devem ser maiores que 20 cm ou um terço da altura útil da viga ($d/3$), conforme é demonstrado na figura 8:

Figura 8 - Armadura de pele



Fonte 11 - <https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/115005054494-Armadura-de-pele-e-longitudinal-de-tor%C3%A7%C3%A3o-de-vigas-segundo-a-NBR-6118-2014->

Estudos realizados pela Fédération Internationale du Béton (FIB) demonstram que a armadura de pele pode reduzir a largura das fissuras em até 80%. No entanto, é importante destacar que a técnica não é a solução para todos os problemas de fissuração em vigas de concreto armado, e que é necessário que a técnica seja aplicada corretamente e dimensionada adequadamente para cada caso específico.

Dessa forma, a armadura de pele é uma solução eficaz para combater a fissuração em vigas de concreto armado, e deve ser considerada uma alternativa viável no projeto e na construção de estruturas desse tipo. A técnica deve ser utilizada com o devido cuidado e análise para garantir sua eficácia e segurança.

3.4.3 Armadura mínima

A armadura mínima em vigas de concreto armado é um dos aspectos mais importantes do projeto estrutural, ao afetar diretamente a segurança e a capacidade de carga da estrutura. A norma brasileira NBR 6118 (2014) define a armadura mínima como a área de armadura longitudinal que, em conjunto com a armadura transversal, é suficiente para garantir o escoamento do concreto comprimido.

Em situações onde a área da seção transversal de concreto é suficiente para resistir a carga que está sendo aplicada, a armadura mínima é empregada a fim de prevenir que ocorra fissuração. Sendo assim a região de concreto tracionado não atingiu a resistência característica a tração do concreto, não ocorrendo a fissuração com apenas as cargas de serviço, para evitar que ocorra a ruptura brusca da viga é utilizado uma área de aço mínima que seja suficiente para resistir aos esforços de flexão.

Segundo Silva (2018), a escolha da armadura mínima deve ser baseada em critérios que considerem as condições de uso da estrutura e as propriedades dos materiais empregados. É importante lembrar que a armadura mínima não deve ser vista como uma restrição mínima para o dimensionamento das vigas, mas sim como um valor mínimo que deve ser respeitado para garantir a segurança da estrutura.

Além disso, a armadura mínima também tem um papel importante na prevenção de fissuras no concreto. Uma armadura insuficiente pode levar a uma distribuição inadequada das tensões na viga, o que pode resultar em fissuras que comprometam a durabilidade da estrutura.

De acordo com a NBR 6118/2014, a armadura mínima deve ser determinada a partir da seguinte equação:

$$A_{s, \min} = \rho_{\min} \times b \times d \quad (2)$$

Onde $A_{s, \min}$ é a área de armadura mínima, ρ_{\min} é a taxa de armadura mínima (que varia de acordo com a classe de agressividade ambiental e o tipo de concreto utilizado), b é a largura da seção transversal da viga e d é a altura útil da viga.

4 METODOLOGIA

Este capítulo apresentará um estudo de caso para avaliação da segurança estrutural de vigas de concreto armado onde foram encontradas diversas fissuras em uma edificação no município de Itaituba-PA.

4.1 Tipo de pesquisa

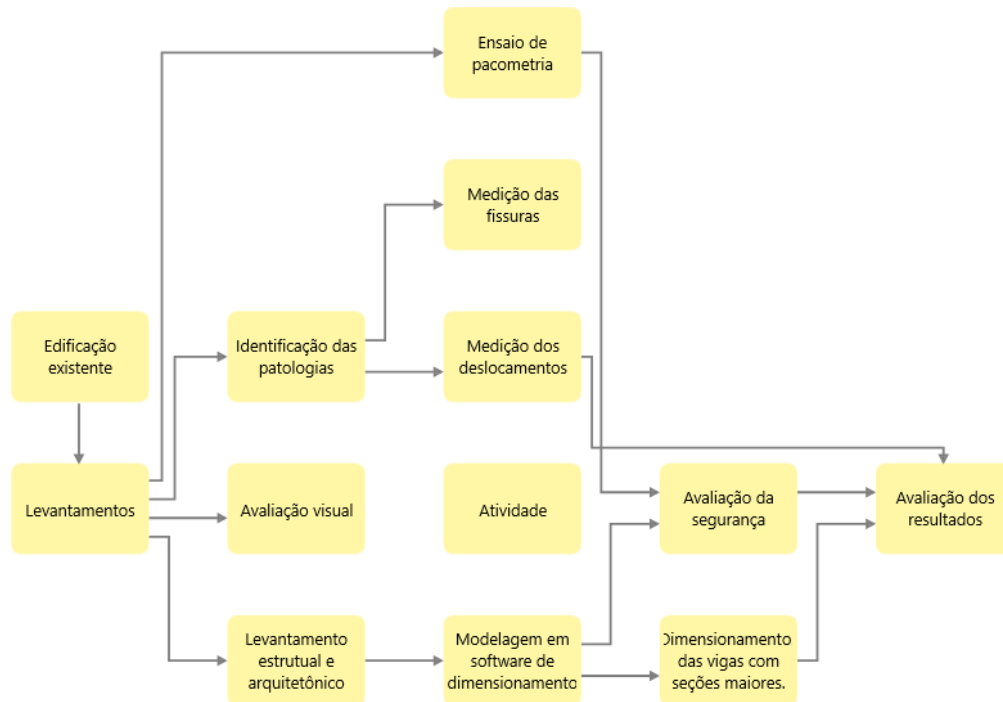
O trabalho foi realizado por meio de uma pesquisa qualitativa do tipo bibliográfica, descritiva e experimental. Sendo realizada a partir da busca de materiais publicados em revistas, publicações acadêmicas, dissertações, outros materiais publicados na literatura, artigos científicos divulgados e disponíveis em meio eletrônico, experimentos realizados e visitas realizadas na edificação.

Este tipo de pesquisa é fundamental para o desenvolvimento do tema abordado, visto que facilita a busca por informações que fornecem base suficiente para o tema em questão. A busca sistematizada se torna relevante pelo fato de a mesma fornecer base científica já validada por outros autores, demonstrando assim qualidade e veracidade ao que está sendo trabalhado, criando assim conhecimento suficiente para abordar o tema que está sendo tratado.

Os dados coletados para a confecção da pesquisa foram, pesquisa do tema, visitas técnicas ao local, elaboração e análise do projeto estrutural, estudos preliminares e ensaios tecnológicos.

O fluxograma mostrado na figura 9, ilustra as etapas seguidas para realização do estudo.

Figura 9 - Fluxograma das etapas de avaliação.



Fonte 12 - Elaborado pelo autor.

4.2 Descrição da edificação.

A fim de levantar as informações necessárias e alcançar os objetivos desejados, foi feito o levantamento de dados através do estudo de caso da estrutura construída em concreto armado, vedações em alvenaria e cobertura em estrutura metálica. As informações necessárias para a realização da pesquisa foram obtidas através da Instituição responsável pelo prédio.

A edificação estudada é de uso educacional, está localizada na Rua Universitário, Bairro Maria Madalena, Itaituba - Pa, constituída por bloco de ensino, refeitório, estacionamento, bloco administrativo, laboratórios e quadra esportiva, a sua construção iniciou no ano de 2009.

A figura 10 mostra uma vista superior da localização do campus da instituição.

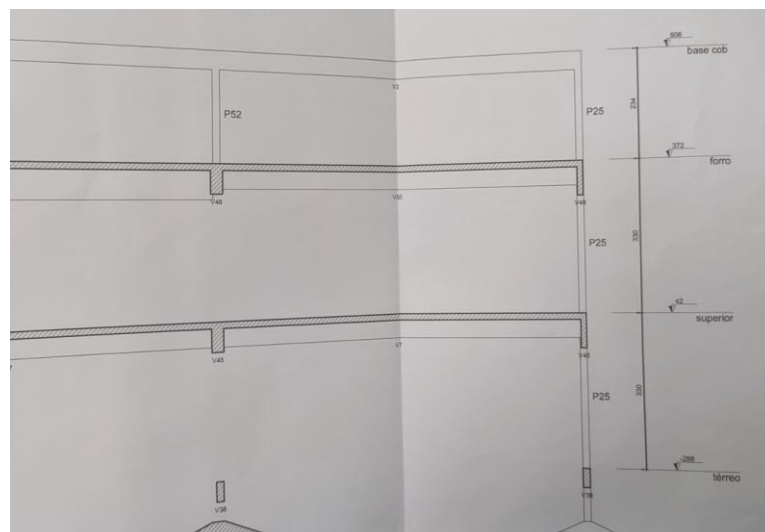
Figura 10 - Mapa da Geolocalização da edificação.



Fonte 13 - Google Maps (2023).

A estrutura é construída em fundações rasas do tipo sapata corrida, e lajes treliçadas, com altura do piso do térreo ao topo da cobertura de 8,95 metros, altura entre os pisos de 3,30 metros. Na figura 11 pode ser observado um corte longitudinal da estrutura.

Figura 11 - Corte transversal da estrutura



Fonte 14 - Elaborado pelo autor.

A figura 12 mostra uma vista superior do Campus.

Figura 12 - Vista superior do Campus.



Fonte 15 - Elaborado pelo Autor.

As patologias surgiram nas vigas do térreo e cobertura, apenas no bloco de ensino é possível verificar se há fissuras nas vigas, devido a existência do forro nos ambientes não foram verificados a existência de fissuras nas demais vigas do prédio. A figura 13 mostra a estrutura onde estão localizadas as fissuras.

Figura 13 - Construção onde estão presentes as fissuras.

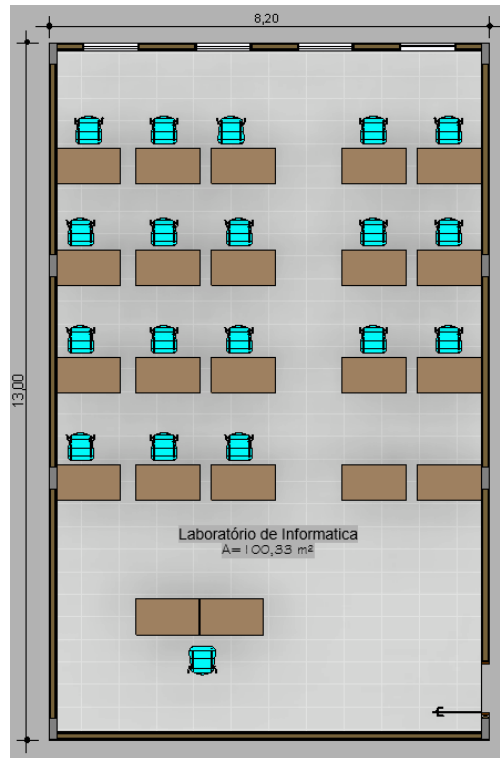


Fonte 16 - Elaborado pelo autor.

A estrutura possui 8 salas de aulas, 1 laboratório de informática, 1 auditório e sala de música. O layout dos ambientes está sendo apresentados nas figuras 14, 15 e 16.

Na figura 14 é mostrado a planta baixa do laboratório de informática.

Figura 14 - Planta baixa do Laboratório de informática



Fonte 17 - Elaborado pelo autor

Na figura 15 é apresentado a planta baixa das salas de aulas presentes no nível térreo e superior.

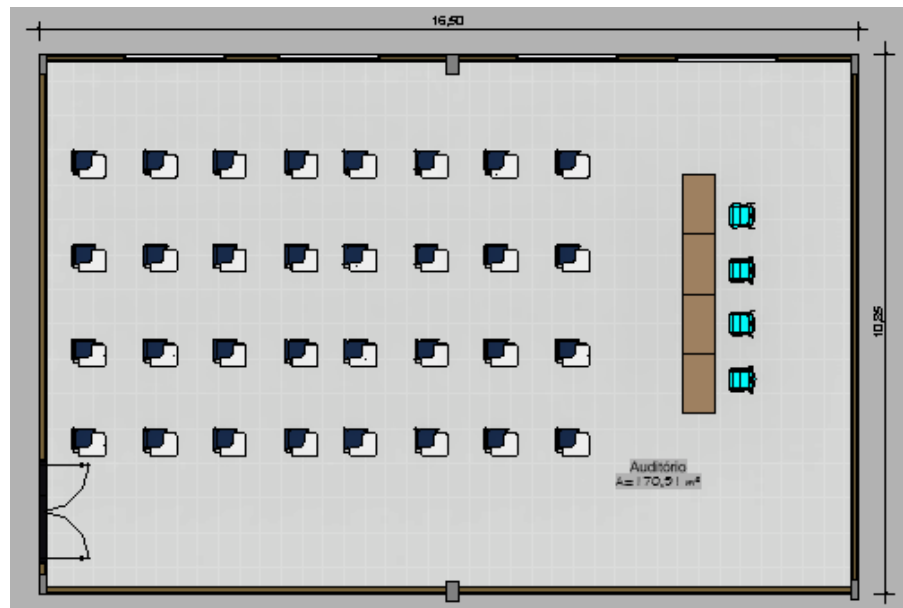
Figura 15 - Planta baixa das salas de aulas



Fonte 18 - Elaborado pelo autor.

A figura 16 mostra planta baixa do auditório que possui as mesmas dimensões da sala de música presente no pavimento acima.

Figura 16 - Planta baixa do auditório.



Fonte 19 - Elaborado pelo autor.

4.3 Procedimento de coleta e interpretação de dados

O estudo de caso foi realizado em três etapas, coleta de dados, diagnóstico e definição do tema a ser estudado. Na coleta de dados, foram realizadas vistorias no local, em busca de informações, criando um relatório dos problemas encontrados, por meio de um levantamento fotográfico, para registrar e identificar as manifestações patológicas.

Não foram encontradas informações detalhadas sobre a construção, bem como diários de obras, registro de matérias utilizados e corpos de provas moldados durante a concretagem. Um dos aspectos que facilitou bastante a realização do estudo foi a disponibilidade de algumas pranchas do projeto estrutural da edificação.

No que diz respeito à avaliação da estrutura, procedeu-se a uma análise da literatura relacionada a fissuração em vigas de concreto armado, com o propósito de facilitar a compreensão completa do problema, compreendendo suas causas e origens. Além disso, realizou-se uma descrição detalhada das características, tamanho das fissuras e localização.

Para isso, foram coletados dados referentes ao projeto estrutural da edificação em questão, tais como as especificações técnicas, as normas aplicáveis, os materiais utilizados e as cargas previstas. Esses dados foram analisados a fim de avaliar a adequação do projeto às condições do terreno e às características da edificação.

A análise do projeto estrutural demonstra que as seções especificadas em projeto foram seguidas, revelando assim um alto controle, na fabricação de formas e concretagem durante a

obra. As plantas do projeto estrutural fornecidas para consulta pela própria instituição através do registro fotográfico são apenas do detalhamento das armaduras do térreo e plantas de forma dos pavimentos, conforme demonstra as figuras 17 e 18, que serviram como base para a construção do modelo estrutural.

Figura 17 - Planta de forma do Pavimento superior.



Fonte 20 - Elaborado pelo Autor

Figura 18 - Planta de forma da cobertura



Fonte 21 - Elaborado pelo autor.

Durante as inspeções realizadas, foi constatada a existência de fissuras, os quais foram causados por um fator comum em todas as vigas. Em face dos sinais evidentes de fissuração nas vigas da estrutura, foram conduzidos diversos testes não destrutivos, a saber, ensaios para determinar a resistência a compressão do concreto, medição das dimensões das fissuras,

medição do deslocamento das vigas e construção de dois modelos estruturais em um software de cálculo e detalhamento de estruturas de concreto armado.

Portanto, o presente diagnóstico foi elaborado por meio de minuciosas inspeções visuais, pela realização de testes no local e análise do projeto estrutural da edificação. Posteriormente, foram identificadas quais vigas possuem fissuras e suas principais causas, comparando as seções de vigas utilizadas na construção com as seções adotadas em um modelo estrutural dimensionado para atender as solicitações para garantir a segurança da estrutura, estado limite ultimo e estado limite de serviço.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Identificação das patologias

Para identificar a complexidade das patologias presentes na edificação, um dos procedimentos utilizados é a inspeção visual afim de identificar a localização e extensão das fissuras. Diante disso, foi feito o levantamento quantitativo em cada pavimento da estrutura onde foram encontradas fissuras, para determinar as causas do problema encontrado.

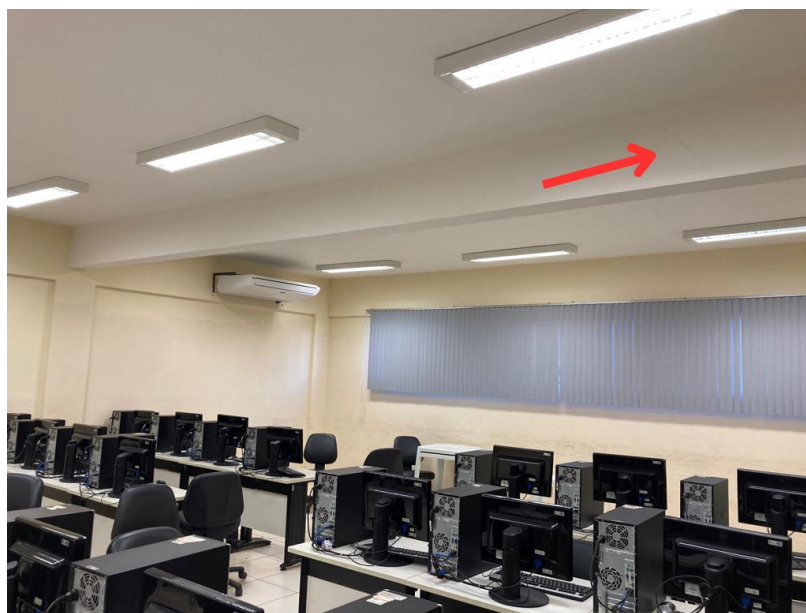
A vistoria na edificação seguiu os seguintes procedimentos;

1. Identificação das vigas com fissuras;
2. Quantidade de fissuras presentes em cada viga;
3. Registro fotográfico das fissuras.

Na inspeção realizada nas vigas da cobertura, foram localizadas várias fissuras em toda a extensão da viga V50 e V51, na V51 em todos os vãos são visíveis as fissuras, sendo encontradas fissuras em ângulos de 45°, 60° e próximos de 90°. Foi feito o relatório fotográfico da estrutura, identificando cada fissura que foi localizada nas vigas, que serão apresentadas nesse capítulo.

A figura 19 mostra a viga 51 com uma fissura próxima ao pilar, sendo a primeira fissura identificada na viga na primeira inspeção no ano 2021.

Figura 19 - Viga V51 vão 1 laboratório de informática.



Fonte 22 - Elaborado pelo autor.

Em uma primeira visita realizada em janeiro de 2021, foi considerada a hipótese de retração hidráulica como provável causa, entretanto foi descartada devido ao aparecimento de mais fissuras ao longo do tempo, o que foi constatado em agosto de 2023 na última visita realizada na estrutura. Para as fissuras abaixo de 0,05 mm em ângulo aproximado de 90° em uma viga de concreto armado pode ocorrer a retração hidráulica do concreto, esse fenômeno ocorre quando o concreto perde água por evaporação ou absorção, gerando tensões internas que podem superar a resistência à tração do material.

As fissuras de retração hidráulica costumam ser passivas, ou seja, não variam com as cargas aplicadas, e podem ocorrer em qualquer fase da vida útil da estrutura, elas são mais comuns em peças esbeltas, com grande superfície exposta e pouca armadura. Com o tempo a fissura na mesma V51 não evoluiu, permanecendo visualmente com a mesma abertura, surgiu uma nova fissura inclinada próxima ao apoio, típica de cisalhamento, como pode ser observado na figura 20.

Figura 20 - Fissura na V51 vão 1 do auditório.

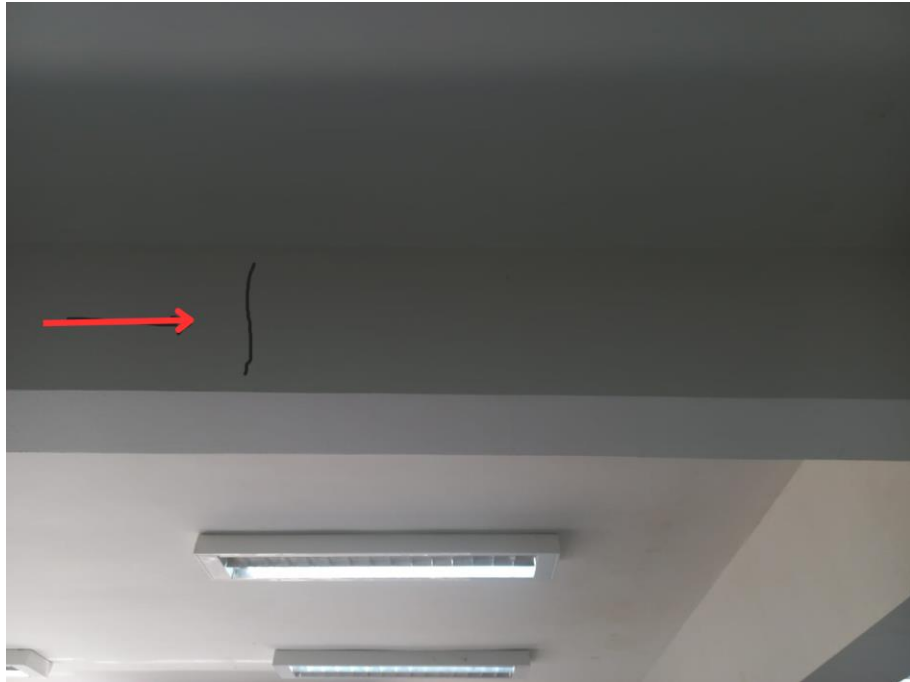


Fonte 23 - Elaborado pelo autor.

Em vigas que não são armadas corretamente para atender as solicitações causadas pelo cisalhamento, e também onde a ancoragem feita, não está de acordo com as normas, feita de forma deficiente, inicialmente podem ocorrer apenas fissuras inclinadas próximas aos apoios dos pilares como foi mostrado anteriormente na figura 20, o que de fato pode ser verificado nas duas visitas feitas na edificação em um período de 2 anos.

A figura 21 mostra uma nova fissura encontrada em agosto de 2023, nesse caso ela se apresenta verticalmente, desde a face superior até a face inferior da viga próximo ao apoio do pilar.

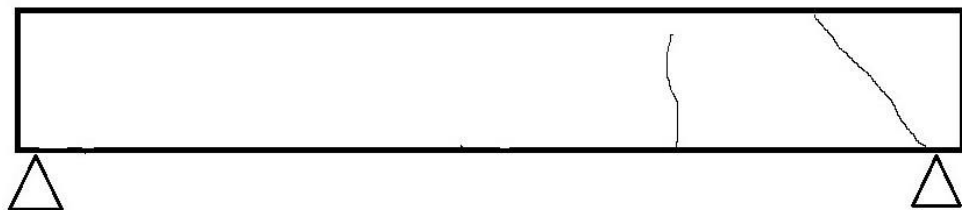
Figura 21 - Fissura na V51 Sala de informática.



Fonte 24 - Elaborado pelo autor.

Na figura 22 é possível ter uma melhor clareza da localização das fissuras na viga 51, que possui 8,30 metros de extensão e uma seção de 15 x 53 cm. Nesse trecho da viga pode ser observado que surgiram dois tipos de fissuras, por cisalhamento e flexão.

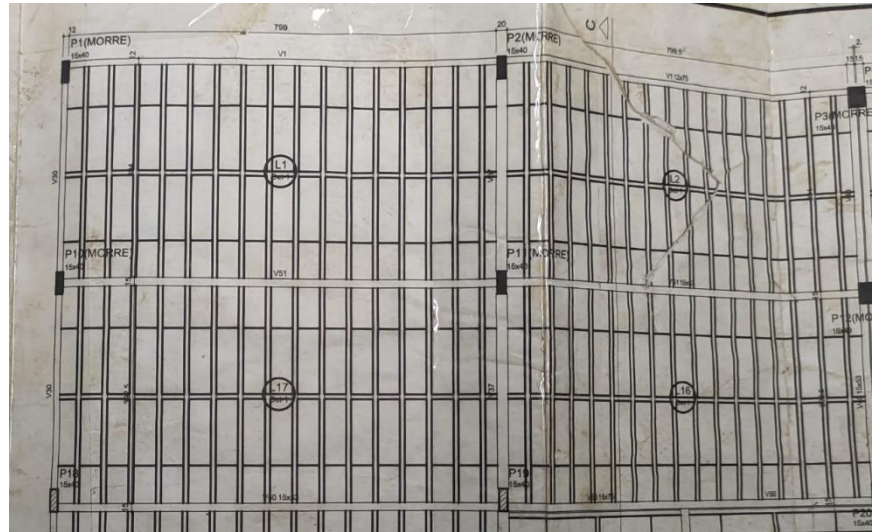
Figura 22 - Localização das fissuras na V51 vão 1.



Fonte 25 - Elaborado pelo autor.

Na figura 23 são apresentados as dimensões e seções das vigas V50 e V51 na planta de forma da cobertura.

Figura 23 - Planta de forma da cobertura.



Fonte 26 - Elaborado pelo autor.

A figura 24 mostra uma fissura próxima do apoio da viga 51 que fica ao lado da viga 50 no laboratório de informática, nesse caso a fissura se desenvolve de forma inclinada próximo ao apoio do pilar.

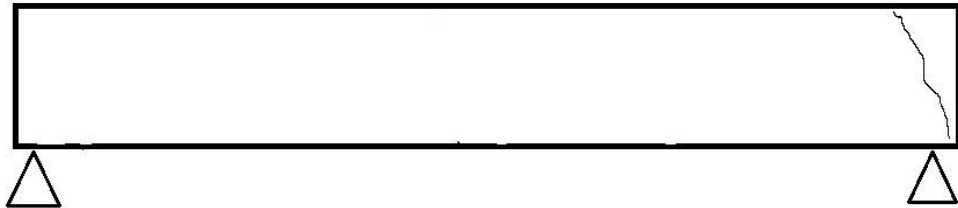
Figura 24 - Fissura na viga V51.



Fonte 27 - Elaborado pelo autor.

A figura 25 mostra a extensão e a localização da fissura na V50.

Figura 25 - Localização da fissura na viga V50.



Fonte 28 - Elaborado pelo autor.

A quantidade de fissuras, extensão e tamanho da abertura, estão diretamente relacionadas com os materiais empregados na sua fabricação, bem como as suas propriedades mecânicas. Em vigas sujeitas a grandes esforços cortantes e que foram armadas de forma a não suportar o cisalhamento, podem surgir inicialmente fissuras inclinadas próximos aos apoios, o que condiz com as fissuras encontradas que pode ser verificada na viga 52 no vão 1, mostrado na figura 26.

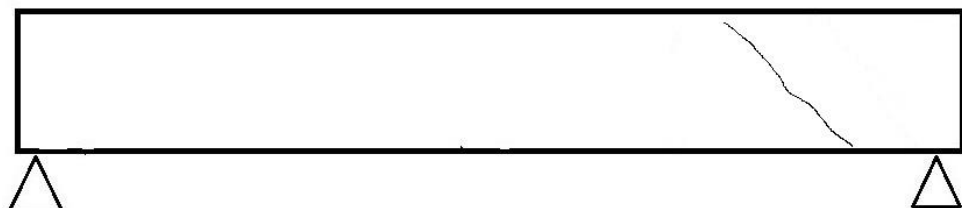
Figura 26 - Fissura na V52 vão 1.



Fonte 29 - Elaborado pelo autor.

A fissura surge próximo ao pilar de apoio, confirmando assim a fissuração por cisalhamento. A localização da fissura pode ser melhor identificada na figura 27.

Figura 27 - Localização da fissura na viga V52 vão 1.



Fonte 30 - Elaborado pelo autor.

Na figura 28 é possível observar que a fissura se estende desde a face inferior da viga em um ângulo aproximado de 45° até o interior da laje, o que pode ocasionar a infiltração de água e conseqüentemente a corrosão das armaduras, caso as armaduras entrem em contato com a água se não existir uma cobertura.

Figura 28 - Localização das fissuras na viga 52 – Vão 3, sala 8.



Fonte 31 - Elaborado pelo autor.

Ao longo da viga 52 são localizadas fissuras no meio vão, verticalmente e se estendendo da face superior a inferior da viga, nessa viga as fissuras estão paralelas e com uma distância muito próxima, conforme mostra a figura 29.

Figura 29 - Localização das fissuras na V52 – Vão 2.

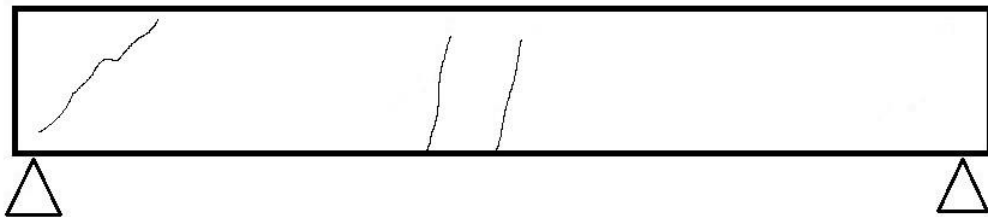


Fonte 32 - Elaborado pelo autor.

Em vigas sujeitas a flexão, as fissuras se desenvolvem de forma quase vertical próximo ao centro da viga em direção à face inferior, onde a viga está mais tracionada. Sendo assim sua abertura é maior nessa região devido aos esforços de tração serem maiores.

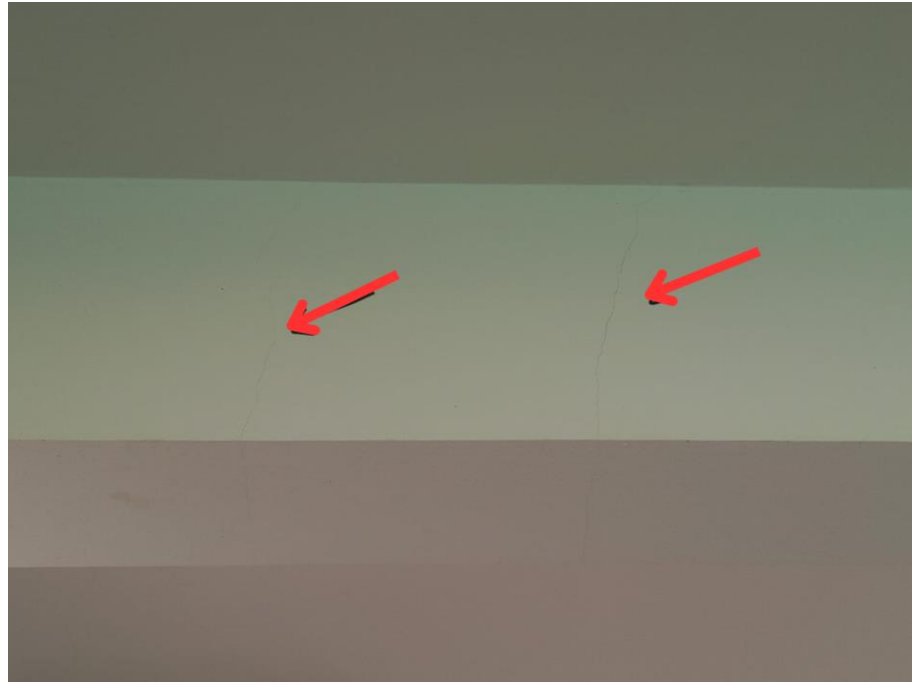
Esse tipo de fissura encontrado na viga pode ser melhor visualizado na figura 30.

Figura 30 - Localização das fissuras.



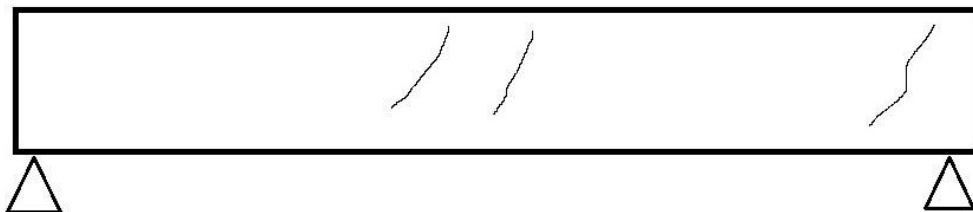
Fonte 33 - Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Fissura causadas por flexão na viga 52.



Fonte 34 - Elaborado pelo autor.

Figura 32 - Localização das fissuras na V52 sala 8.



Fonte 35 - Elaborado pelo autor.

As fissuras próximas de 45° em uma viga de concreto podem ser causadas pelo esforço cortante na seção transversal da peça. Esse esforço tende a cortar a viga, gerando tensões de cisalhamento que podem superar a resistência do concreto, quando a armadura é insuficiente, pode ocorrer o escoamento ocasionando intensa fissuração.

Para evitar esse tipo de fissura é necessário ocorrer o correto dimensionamento ao esforço cortante para evitar o deslizamento entre as partes da viga e aumentar a resistência ao cisalhamento. As fissuras de cisalhamento costumam ser ativas, ou seja, variam com as cargas aplicadas.

A figura 33 mostra uma fissura, próximo a um dos pilares de apoio da viga 52 entre 45° e 60° .

Figura 33 - Fissura na viga 52 próximos ao apoio, sala 9.



Fonte 36 - Elaborado pelo autor.

Na sala 9, surgiram duas fissuras no meio do vão da viga 52, conforme é apresentado na figura 34, esse tipo de fissura é típica de vigas onde as tensões aplicadas excederam a capacidade da viga de suportar os esforços de flexão.

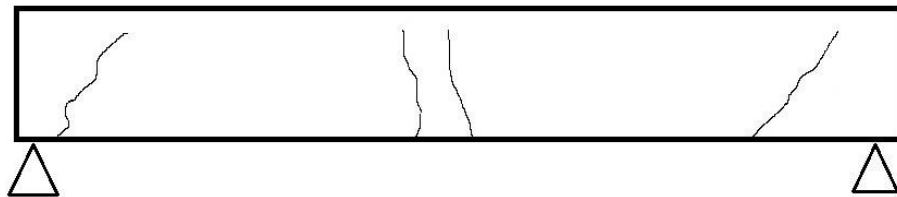
Figura 34 - Fissura na V52, sala 9.



Fonte 37 - Elaborado pelo autor.

Quando dimensionadas a flexão no domínio 2 e 3 antes de ocorrer a ruína, ou seja, o colapso, surgem fissuras verticais acompanhadas de deslocamentos na viga, essas patologias servem como aviso que a armadura longitudinal pode estar escoando e próxima a ruína. Já em vigas dimensionadas no domínio 4 não ocorrem fissuras ou deslocamentos, a ruína da viga se dá pelo esmagamento do concreto, nessa situação a armadura não escoava ocasionando assim uma ruína sem aviso e de forma abrupta.

Figura 35 - Localização das fissuras na V52 sala 9.



Fonte 38 - Elaborado pelo autor.

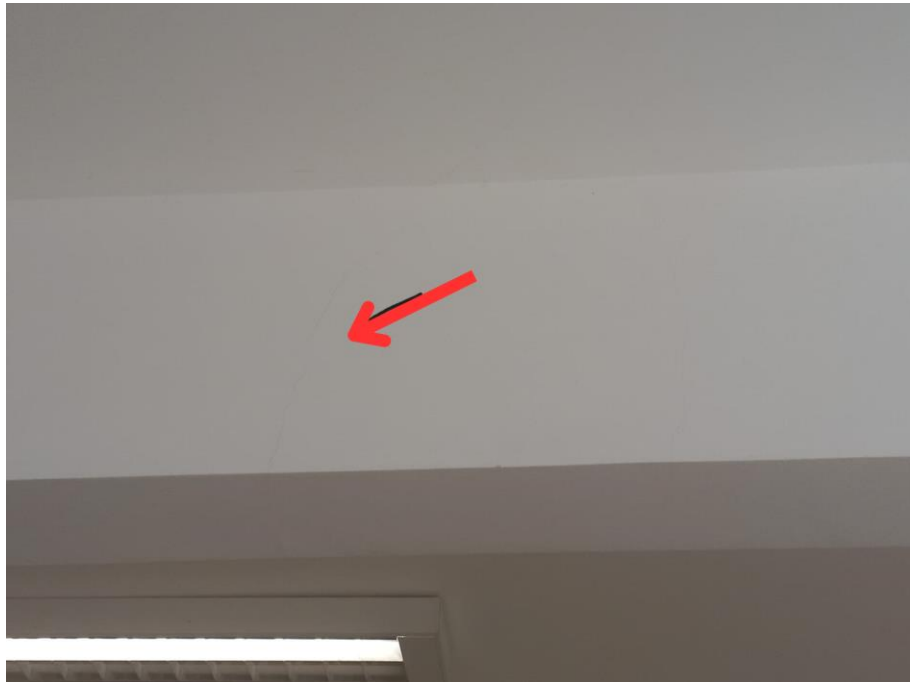
No vão 4 da viga 52 que está no auditório são verificadas fissuras próximas ao apoio do pilar, conforme é apresentado na figura 36 e 37.

Figura 36 - Fissura inclinada próximo ao apoio na V52 vão 4 do auditório.



Fonte 39 - Elaborado pelo autor.

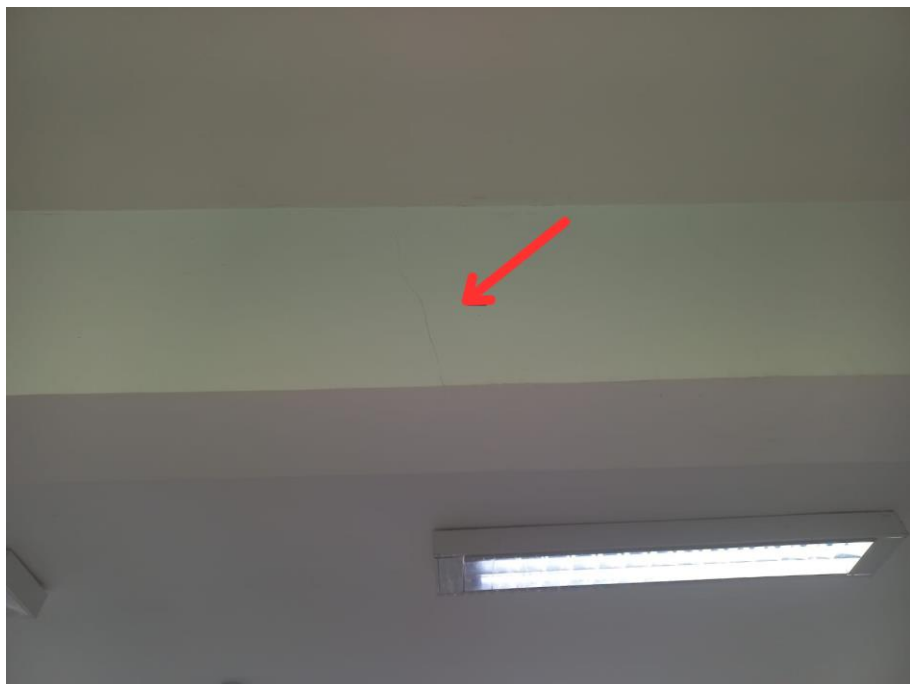
Figura 37 - Fissura no centro da viga V52 Vão 4.



Fonte 40 - Elaborado autor.

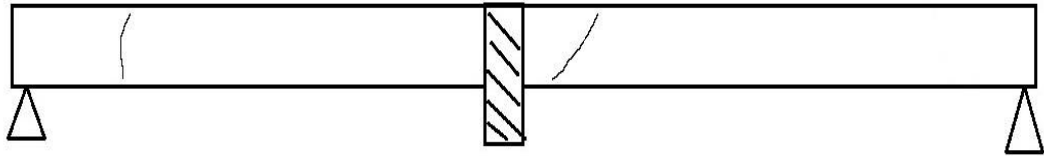
Dado o seu comprimento e as cargas sobre a laje que está apoiada no pavimento acima o esforço cortante que atua na viga é muito alto, ocasionando assim grande sollicitação pelo esforço cortante. Sendo assim, surgem fissuras próximas aos apoios tanto dos pilares quanto da viga em que a mesma está apoiada.

Figura 38 - Fissura inclinada próximo ao apoio na viga V48 vão 5 do auditório.



Fonte 41 - Elaborado pelo autor.

Figura 39 - Localização das fissuras na V52 vão 4 e 5.



Fonte 42 - Elaborado pelo autor.

Na figura 40 pode ser observado na viga 55 vão 4 a presença de uma fissura típica de cisalhamento, esse tipo de fissura apresentada é frequentemente encontrado em vigas onde ocorreu o escoamento ou a ruptura da armadura transversal, dada a deficiência da armadura resistir as tensões geradas pela tração ocasionada pelo esforço cortante. Sendo assim, a viga tende se dividir em duas partes com uma fissura na diagonal, mesma direção das tensões.

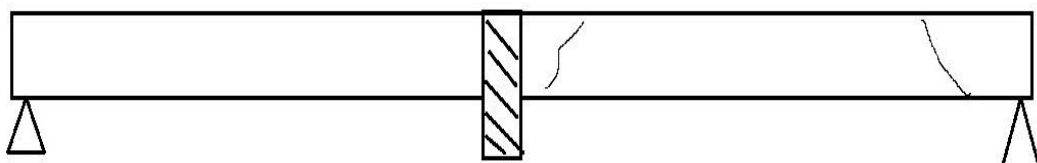
Figura 40 - Fissuras na V55 vão 4.



Fonte 43 - Elaborado pelo autor.

Na figura 41 é possível ter uma maior clareza da dimensão das fissuras, bem como sua localização e extensão.

Figura 41 - Localização das fissuras na V55 vão 4 e 5.



Fonte 44 - Elaborado pelo autor.

Quando a armadura de cisalhamento é insuficiente, pode ocorrer o escoamento, provocando a fissuração que se estende até a região comprimida pela flexão. Ocorrendo assim uma sobrecarga no concreto, ocasionando o esmagamento na região comprimida, mesmo que o momento fletor seja inferior a tensão de ruptura do concreto, gerando a ruptura do banzo comprimido por cisalhamento.

5.2 Dimensão das fissuras

Ambrosio (2004) traz que a faixa de variação padrão das aberturas de fissuras estão distribuídas em 3 faixas, sendo elas:

- Normal: abertura entre 0,05 mm e 0,3 mm (ocorrência);
- Atenção: abertura entre 0,3 mm e 0,7 mm (anomalia);
- Crítico: abertura superior a 0,7 mm (anomalia).

A NBR 9575 (2010) classifica como microfissuras aberturas inferiores a 0,05 mm, fissuras as aberturas inferiores a 0,5 mm e trincas as aberturas inferiores 1 mm.

Para diagnosticar se a trinca está progredindo, ou seja, se há um aumento na abertura com o passar do tempo, é necessário realizar testes. Existem aparelhos que permitem medir a variação dessas aberturas, como os deflectômetros, eles são colocados sobre as fissuras sendo constituídos por calços de gesso, tiras de vidro ou de papel, no entanto, esses aparelhos apenas permitem detectar grosseiramente eventuais acréscimos da abertura.

Para medir a abertura das fissuras de forma rápida e econômica, pode-se utilizar o fissurometro. Trata-se de um pequeno instrumento destinado a medir esse tipo de abertura, outro instrumento que pode ser utilizado é o comparador de fissuras, que permite quantificar com menor ou maior rigor a abertura das trincas.

A pesquisa se concentrou na medição da abertura das fissuras com o uso do fissurometro, as fissuras foram fotografadas e analisadas de acordo com suas respectivas disposições na viga dos dois pavimentos da edificação, as fissuras foram comparadas para análise dos fatores que as causaram. A figura 42 mostra o fissurometro utilizado.

Figura 42 - Gabarito de fissuras.



Fonte 45 - Elaborado pelo autor.

A comparação das fissuras encontradas nas vigas do pavimento térreo e da cobertura com o gabarito de fissuras demonstraram um valor dentro do aceitável, conforme o recomendado pela NBR 6118/2014, sendo a maioria das vigas estudadas estão entre 0,05 mm e 0,3 mm de abertura.

As figuras 43, 44 e 45 mostram como foi realizada a medição da abertura das fissuras. Na figura 43 pode ser comparado abertura da fissura com o fissurômetro na viga 4, nesse caso a abertura está abaixo de 0,05 mm igualmente aos demais casos mostrados.

Figura 43 - Medição de fissura, sala 8 viga V4 vão 4.



Fonte 46 - Elaborado pelo autor.

Figura 44 - Medição de fissura, viga V4 vão 3.



Fonte 47 - Elaborado pelo autor.

Figura 45 - Medição de fissura, viga 52 vão 2.



Fonte 48 - Elaborado pelo autor.

Foram encontradas fissuras entre 0,05 mm e 0,10 mm e algumas vigas do pavimento superior fissuras de 0,30 mm, sendo analisado as vigas do térreo e superior, sendo que a abertura máxima não ultrapassou 0,30 mm. A NBR 6118/2014 recomenda que a abertura máxima para vigas que não possuem protensão não exceda 0,4 mm para a classe de agressividade ambiental 1, 0,3 mm para a classe 2 e 0,2 mm para a classe 4, foi adotado como critério de cálculo para a estrutura a classe de agressividade 2 para edificações em ambientes urbanos, desse modo a abertura máxima permitida será de 0,30 mm conforme é apresentado na tabela 4.

Tabela 4 - Exigências relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.

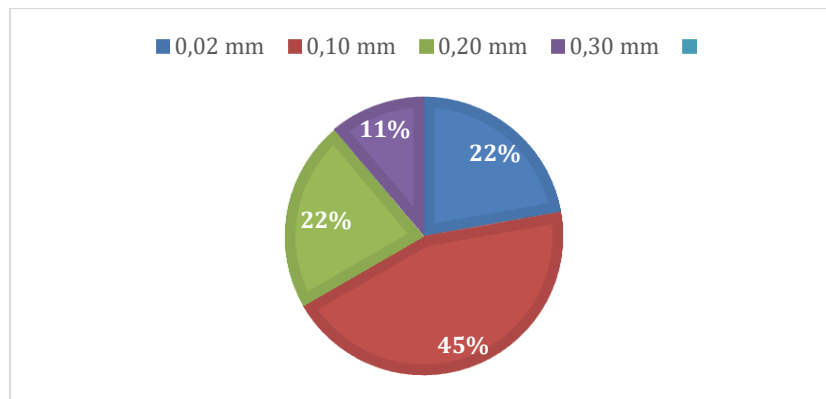
Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	–
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	

Fonte 49 - NBR 6118 (2014).

Foram analisadas 20 vigas nos dois pavimentos que compõe o bloco de ensino da instituição, totalizando 144 metros lineares, as seções transversais das vigas em questão foram, 18 unidades de 15 x 53 cm e 2 unidades de 25 x 63 cm.

O gráfico 1 mostra os percentuais da quantidade fissuras encontradas por tamanho de abertura.

Gráfico 1- Percentual de fissuras encontradas na edificação.



Fonte 50 - Elaborado pelo autor.

A maior concentração de fissuras na estrutura foi no meio do vão das vigas e próximo aos apoios. A viga 52, no seu vão 3, foi a que apresentou maior quantidade de fissuras, um total de 4 fissuras de diferentes tamanhos de aberturas, distribuídas no meio do vão e próximo aos apoios dos pilares. Os valores da tabela 13.4 da NBR 6118/2014 consideram a abertura máxima 0,3 mm considerando a classe de agressividade ambiental 2 para o estado limite de serviço em vigas de concreto armado.

5.3 Deslocamentos

Diversos fatores podem contribuir para o deslocamento de uma viga de concreto, Nawy (2008) destaca que a seção transversal de uma viga, as propriedades dos materiais que estão sendo utilizados, o comprimento da viga, os tipos de apoios, o carregamento que está sendo

aplicado e a zona de fissuração do concreto. Esses fatores são determinantes para gerarem deslocamentos excessivos que venham comprometer o uso da estrutura.

As estruturas de concreto devem ser projetadas de tal forma que garantam a segurança e estabilidade durante sua vida útil através das solicitações que estará sujeita. Os deslocamentos que venham ocorrer na estrutura devem estar dentro do limite estabelecido pela NBR 6118/2014.

Na figura 46 estão classificados os tipos de deslocamentos, bem como o limite para cada tipo de cargas e ambientes.

Figura 46 - Limites para deslocamentos.

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$l/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$l/250^a$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$l/350 + \text{contraflecha}^b$
			Ocorrido após a construção do piso	$l/600$
Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento	
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$l/500^c$ e 10 mm e $\theta = 0,0017 \text{ rad}^d$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$l/250^c$ e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente ($\psi_1 = 0,30$)	$H/1700$ e $H/850^e$ entre pavimentos ^f
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$l/400^g$ e 15 mm

^a As superfícies devem ser suficientemente inclinadas ou o deslocamento previsto compensado por contraflechas, de modo a não se ter acúmulo de água.

^b Os deslocamentos podem ser parcialmente compensados pela especificação de contraflechas. Entretanto, a atuação isolada da contraflecha não pode ocasionar um desvio do plano maior que $l/350$.

^c O vão l deve ser tomado na direção na qual a parede ou a divisória se desenvolve.

^d Rotação nos elementos que suportam paredes.

^e H é a altura total do edifício e H_1 o desnível entre dois pavimentos vizinhos.

^f Esse limite aplica-se ao deslocamento lateral entre dois pavimentos consecutivos, devido à atuação de ações horizontais. Não podem ser incluídos os deslocamentos devidos a deformações axiais nos pilares. O limite também se aplica ao deslocamento vertical relativo das extremidades de lntéis conectados a duas paredes de contraventamento, quando H_1 representa o comprimento do Intel.

^g O valor l refere-se à distância entre o pilar externo e o primeiro pilar interno.

NOTAS

1 Todos os valores-limites de deslocamentos supõem elementos de vão l suportados em ambas as extremidades por apoios que não se movem. Quando se tratar de balanços, o vão equivalente a ser considerado deve ser o dobro do comprimento do balanço.

2 Para o caso de elementos de superfície, os limites prescritos consideram que o valor l é o menor vão, exceto em casos de verificação de paredes e divisórias, onde interessa a direção na qual a parede ou divisória se desenvolve, limitando-se esse valor a duas vezes o vão menor.

3 O deslocamento total deve ser obtido a partir da combinação das ações características ponderadas pelos coeficientes definidos na Seção 11.

4 Deslocamentos excessivos podem ser parcialmente compensados por contraflechas.

Fonte 51 - NBR 6118/2014.

Para determinar se as vigas em análise sofreram deslocamentos após a construção, foram medidos a distância da face inferior da viga até o piso, sendo realizadas 3 medições, no centro e nas extremidades junto aos pilares. Nesse processo de medição dos deslocamentos a diferença entre os valores medidos foram de centímetros e para isso foi utilizado uma trena digital a laser para garantir uma melhor precisão.

Nas tabelas 5 e 6 são apresentados os valores dos deslocamentos medidos.

Tabela 5 - Deslocamentos medidos, para as vigas do pavimento superior.

Viga	Vão	Deslocamentos (cm)
V5 -1	1	0,75
2	2	0,22
V3 -1	1	0,7
2	2	0,2
V4 -1	1	0,90
2	2	1,26
3	3	1,02
4	4	2,3
5	5	1,6

Fonte 52 - Elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Deslocamentos medidos, para as vigas da cobertura.

Viga	Vão	Deslocamentos (cm)
V50 -1	1	1,10
2	2	1,02
V51 -1	1	0,8
2	2	1,1
V52 -1	1	0,85
2	2	1,25
3	3	0,98
4	4	2,1
5	5	1,3

Fonte 53 - Elaborado pelo autor.

5.3.1 Resistência à compressão do concreto

O controle do concreto é essencial, sendo necessário seguir as normas específicas, realizando testes e ensaios para que assim seja possível assegurar sua resistência, durabilidade, acompanhamento de todas as etapas de produção, transporte, controle, recebimento, lançamento e execução dos elementos estruturais.

Um dos métodos de avaliação da resistência do concreto é o ensaio de esclerometria que é um método não destrutivo que mede a dureza superficial do concreto, fornecendo uma estimativa da sua resistência à compressão. Esse ensaio é realizado com um aparelho chamado esclerômetro de impacto, que consiste em uma massa martelo impulsionada por uma mola contra a superfície do concreto, o recuo da massa martelo é proporcional à dureza do concreto, que por sua vez está relacionada com a sua resistência.

Foram feitos ensaios em 2 vigas, localizadas no térreo e na cobertura da edificação, realizadas no dia 02/03/2021 no período das 09h às 10h. Em relação ao concreto utilizado na obra, não existem informações de qual foi o tipo de concreto utilizado, dosagem, materiais empregados ou sua resistência verificada através do rompimento de corpos de prova.

O equipamento utilizado no ensaio foi o esclerômetro da empresa SADT modelo Conrete Test Hammer HT-225D, apresentado na figura 47, possui faixa de medição / Resistência do concreto à compressão: 10 - 70 N/mm² ou 1.450 a 10.152 psi e energia de impacto: 0.225kgm (\pm 2.207J 0.100J) para testar construção de edifícios e pontes.

Figura 47 - Esclerômetro utilizado no ensaio de compressão superficial do concreto.



Fonte 54 - Elaborado pelo Autor.

O equipamento é recomendado para verificação da uniformidade em diferentes partes da estrutura, avaliação das características mecânicas do concreto através de curvas de correlação, avaliação das mudanças nas propriedades do concreto ao longo do tempo. Uma das principais características do equipamento é avaliar a resistência a compressão do concreto em estruturas após a construção de forma não destrutiva.

As leituras foram realizadas nas vigas com o esclerômetro na posição horizontal, a espessuras das vigas são de 15 cm, as superfícies foram limpas e secas conforme recomenda a norma. As áreas foram polidas através do disco, para que a superfície de impacto estivesse de

forma mais plana possível, na leitura foi utilizado um gabarito de 4 x 4, com 16 pontos de leituras distantes a 30 cm entre os eixos.

O primeiro trecho analisado está localizado no térreo, para o ensaio foi selecionado o trecho 1 da viga 3. O segundo ensaio ocorreu na viga 52, na tabela 7 são mostrados os valores do índice esclerométrico encontrados através do ensaio.

Tabela 7 - Índice Esclerométrico para as Vigas 3 e 52.

Viga	Índice Esclerométrico Medido (IE)													K	1,02		IEM	IEE
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		14	15		
V3-1	23	24	23	24	25	24	25	25	23	24	24	23	24	23	24	24	23,8	23,9
V52-1	23	24	22	24	24	24	25	22	23	24	23	23	24	23	24	23	23,4	24,35

Fonte 55 - Elaborado pelo autor.

- IEE: Índice esclerométrico médio efetivo
- K: Coeficiente de correção do índice esclerométrico, obtido quando da aferição do aparelho
- IEM: Índice esclerométrico médio

Os ensaios realizados in loco resultaram em valores próximos de 25 MPa, mesmo valor utilizado em projeto, apresentando pequenas variações percentuais devido à interferência do aço, reboco ou até mesmo imprecisões do equipamento. O ensaio foi realizado conforme o método para avaliação da dureza superficial do concreto endurecido pelo uso de esclerômetro de reflexão prescrito pela NBR 7584/2012.

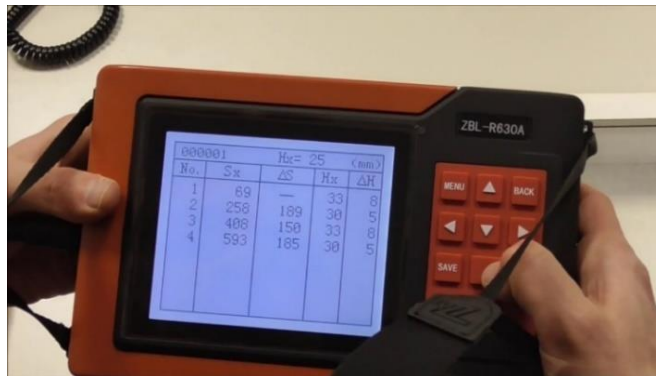
5.4 Identificação das armaduras

É de grande importância conhecer as armaduras empregadas na estrutura, as longitudinais, estribos, bem como o diâmetro, quantidade e posição das barras. Existem diversos métodos empregados para identificar as armaduras em vigas que precisam de algum tipo de reforço, podemos destacar a escarificação, sendo um processo de remoção da camada de concreto acima das armaduras.

Esse processo não pode ser realizado, devido a necessidade de alocar maiores recursos, e poderia causar algum dano a estrutura, sendo necessário realizar escoramento e a paralisação das atividades na instituição até que o processo fosse concluído. Outra forma de identificar as armaduras é a utilização do pacômetro, um aparelho digital que através de ondas eletromagnéticas consegue identificar, diâmetro e posição das armaduras.

Foi utilizando o pacômetro para a detecção da posição e diâmetro das armaduras para assim obter uma maior precisão na comparação com as armaduras detalhadas durante a análise do projeto estrutural, o aparelho utilizado é similar ao da figura 48. Dada uma certa imprecisão do equipamento não foi possível identificar os diâmetros das barras de aço, o aparelho estava descalibrado, possui pouco material didático para estudar o seu funcionamento e uma interface de difícil manuseio, o aparelho limita-se a indicar a posição das barras, não mostrando a distância exata e o diâmetro.

Figura 48 - Pacômetro para a detecção da posição do aço.

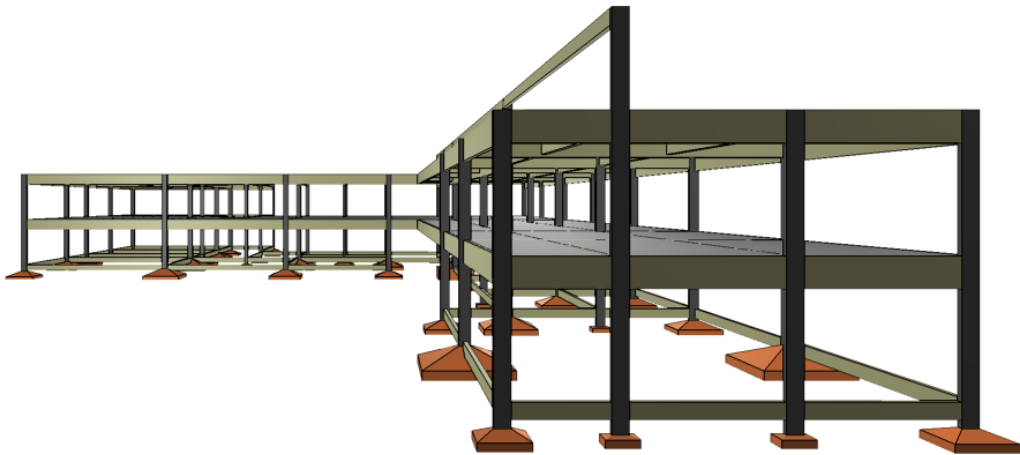


Fonte 56 - Elaborado pelo Autor.

5.5 Análise do projeto estrutural com um software de cálculo estrutural

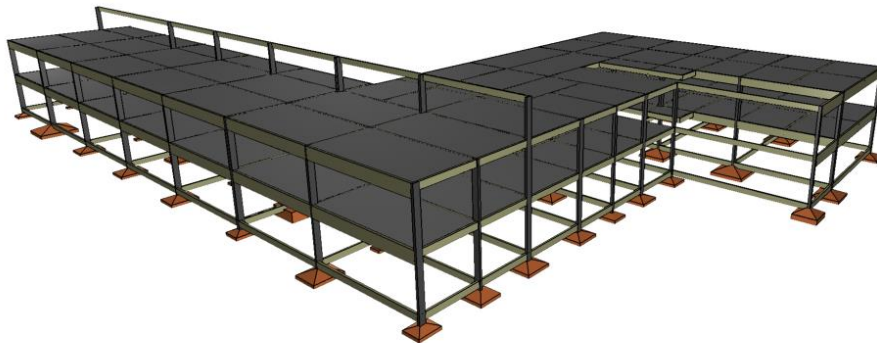
De posse das informações necessárias para a construção de uma modelagem da estrutura através de um software de cálculo e detalhamento de armaduras, foi realizado o processamento da estrutura a fim de obter os relatórios de análise. Para obter resultados que ajudem a entender o comportamento da estrutura que foi construída diante das cargas que estão sendo consideradas, nas figuras 49 e 50 é apresentada uma vista tridimensional da estrutura.

Figura 49 - Modelo tridimensional da estrutura produzido com um software de cálculo e detalhamento.



Fonte 57 - Elaborado pelo autor.

Figura 50 - Modelo tridimensional da estrutura produzido com um software de cálculo e detalhamento.



Fonte 58 - Elaborado pelo autor.

Em relação aos carregamentos aplicados para gerar os esforços solicitantes que irão atuar sobre a estrutura, é muito importante tentar simular o mais aproximado possível ao que foi considerado pelo projetista. Sendo assim, os carregamentos utilizados no dimensionamento da estrutura estão sendo apresentados na tabela 8.

Tabela 8 - Carregamentos aplicados na estrutura.

Carregamento	Peso específico
Peso específico do concreto armado	2500.00 kgf/m ³
Laboratórios (Cargas)	3 kN/m ²
Auditório com assentos fixos (cargas)	4 kN/m ²
Sala de aula (cargas)	3 kN/m ²
Cobertura (Cargas)	281.5 Kgf/m ²
Alvenaria	183.60 Kgf/m

Fonte 59 - Elaborado pelo autor.

Na tabela 9 são apresentados as ações e carregamentos considerados.

Tabela 9 - Ações atuantes na estrutura.

Ação	Carregamentos (tf)	Percentual (%)
Peso próprio	1014.44	45.4
Adicional	523.06	23.4
Acidental	695.44	31.1
TOTAL	2232.94	100.0

Fonte 60 - Elaborado pelo autor.

Após ser feito todo o lançamento estrutural de vigas, pilares e fundações conforme está indicado no projeto estrutural, é realizado o processamento da estrutura. Feito a análise estática e linear da estrutura o software gera um relatório de erros de dimensionamento, conforme é mostrado na tabela 10, que apresenta a quantidade de elementos que não foram dimensionados devido a erros.

Tabela 10 - Elementos não dimensionados na primeira análise.

Elementos de concreto				
Pavimento	Elementos	Com sucesso	Com avisos	Com erros
Base da Cobertura	Vigas	0	2	0
	Pilares	0	6	2
Forro	Vigas	7	29	5
	Lajes	0	30	16
	Pilares	18	1	30
Superior	Vigas	5	20	14
	Lajes	0	18	28
	Pilares	6	11	31
Térreo	Vigas	0	41	0
	Sapatas	39	0	8
	Pilares	2	39	8

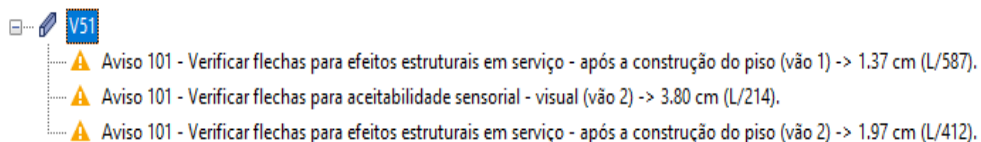
Fonte 61 - Elaborado pelo autor.

Os principais erros indicados pelo software foram:

- Erro na armadura positiva;
- Diâmetro insuficiente para a torção;
- Centro de gravidade da armadura muito alto;
- Erro na armadura de grampo;
- Diâmetro insuficiente para a compressão;
- Taxa de armadura excedendo o limite prescrito pela norma;
- Nenhuma bitola pode ser usada.

Apesar da quantidade de erros apresentado pelo software, as vigas V50, V51, V52, V3, V4, V5 e V7 são dimensionadas e suas armaduras detalhadas. O software ainda mostra uma série de avisos sobre flecha excessiva para a viga 51, como é mostrado na figura 51.

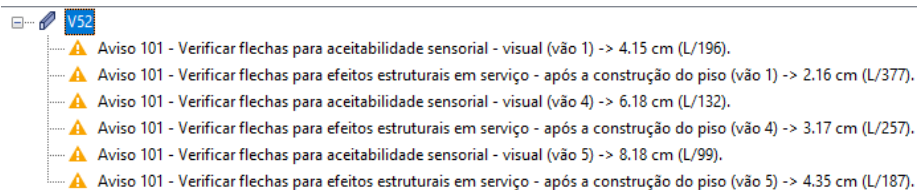
Figura 51 - Avisos mostrado pelo software mostrados após a análise para a V51.



Fonte 62 - Elaborado pelo autor.

Na figura 52 também são apresentados avisos sobre flecha excessiva para a viga 52.

Figura 52 - Avisos mostrados pelo software mostrados após a análise para a V52.



Fonte 63 - Elaborado pelo autor.

Após o processamento da estrutura foram realizadas várias análises do projeto, flechas em vigas e lajes, flambagem dos pilares. A norma utilizada como parâmetro para a análise foi a NBR 6118/2014 vigente ainda no ano de 2023, mas deve ser destacada que a estrutura foi construída no ano de 2009, estando vigente ainda a NBR 6118/2007.

Nas tabelas a seguir são comparados os resultados obtidos a partir da modelagem de duas estruturas, a primeira está conforme as seções das vigas e pilares que foram dimensionados utilizando como base o projeto estrutural da edificação, o segundo foi dimensionado com base nos erros na estrutura que foram identificados pelo software. Diante disso, foram necessárias alterações na estrutura a fim de atender as exigências da norma.

Nas tabelas 11 e 12 são apresentados os dados referentes as vigas 3 e 4 do térreo, bem como as seções utilizadas, armaduras e flecha.

Tabela 11 - Comparativo de armaduras das vigas do térreo.

VIGAS	Estrutura original					
	Seção (cm)	As inferior	As superior	Asw	As de pele	Flecha (mm)
V3	15 x 53	5 ϕ 16	2 ϕ 12.5	ϕ 5.0 c/ 13	*	-1,92
	15 x 53	6 ϕ 16	3 ϕ 12.5	ϕ 5.0 c/ 13	*	-2,74
V4	15 x 53	6 ϕ 16	4 ϕ 12.5	ϕ 5.0 c/ 13	*	-2,88
	15 x 53	4 ϕ 16	*	ϕ 6.3 c/ 29	*	-1,65
	15 x 53	4 ϕ 16	*	ϕ 6.3 c/ 29	*	-1,51
	15 x 53	5 ϕ 16	2 ϕ 10.0	ϕ 6.3 c/ 14	2x3 ϕ 6.3	-3,94
	15 x 53	6 ϕ 20	5 ϕ 12.5	ϕ 6.3 c/ 17	2x2 ϕ 8.0	-5,04

Fonte 64 - Elaborado pelo autor.

Tabela 12 - Comparativo de armaduras das vigas do térreo.

VIGAS	Estrutura modificada						
	Seção (cm)	As inferior	As superior	Asw	As de pele	Flecha (cm)	Flecha limite
V3	15 x 70	4 ϕ 16	*	ϕ 5.0 c/ 25	2x3 ϕ 8.0	-2.3	3,25
	15 x 70	6 ϕ 16	*	ϕ 5.0 c/ 25	2x2 ϕ 10.0	-1.53	3,25
V4	15 x 70	9 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 25	2x2 ϕ 10.0	-2.3	3,25
	15 x 70	6 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 25	2x2 ϕ 10.0	-1.53	3,25
	15 x 70	6 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 20	2x2 ϕ 8.0	-1.25	3,25
	20 x 75	6 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 20	2x2 ϕ 8.0	-2.77	3,25
	20 x 75	7 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 20	2x2 ϕ 8.0	-2.85	3,25

Fonte 65 - Elaborado pelo autor.

Durante a análise da estrutura, verificou-se que a mesma atende ao estado de limite ultimo ELU, que é um critério de segurança estabelecido pela NBR 6118/2014. Ele está relacionado ao estado onde a estrutura já não pode ser utilizada por razão de esgotamento da capacidade resistente e risco à segurança.

No entanto, as vigas V3 e V4 foram dimensionadas com uma taxa de armadura muito alta a fim de atender aos esforços solicitantes devido a seção da viga ter uma altura menor ao que seria o ideal para garantir o máximo aproveitamento das propriedades do concreto e do aço, ultrapassando assim a taxa máxima de 4% para vigas de concreto armado especificada pela norma no item 17.3.5.3.2.

No trecho 4 e 5 da viga, ocorrem flechas excessivas quando considerado $L/250$, ultrapassando assim o limite de 3,25 cm de flecha máxima conforme o que é recomendado pela norma de concreto armado. Diante disso, é necessário aumentar a seção transversal da viga 4 para 20 x 75 cm, visto que a mesma possui um comprimento total de 16 m divididos em 2 trechos de 8 m apoiado sobre uma viga transversal.

Nas tabelas 13 e 14 são apresentados os dados referentes as vigas da cobertura, fazendo o comparativo entre as duas estruturas.

Tabela 13 - Comparativo de vigas da cobertura.

VIGAS	Estrutura original					
	Seção	As inferior	As superior	Asw	As pele	Flecha (cm)
V50	15 x 53	4 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 26	*	-2.27
	15 x 53	4 ϕ 12.5	2 ϕ 12.5	ϕ 5.0 c/ 26	*	-2.00
V51	15 x 53	5 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 26	*	-2.80
	15 x 53	6 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 26	*	-4.03
V52	15 x 53	6 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 26	*	-4.30
	15 x 53	4 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 26	*	-2.12
	15 x 53	4 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 26	*	-2.04
	15 x 53	4 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 26	*	-6.39
	15 x 53	5 ϕ 16.0	2 ϕ 10.0	ϕ 5.0 c/ 26	*	-8.05

Fonte 66 - Elaborado pelo autor.

No trecho 4 e 5 da viga 52, ocorre o mesmo problema encontrado na viga 4 do térreo nos trechos 4 e 5, mas nesse caso os deslocamentos são excessivos, ultrapassando o limite de flecha máxima apresentado na tabela 14. Sendo assim, é necessário também alterar as seções das vigas nesse pavimento para não ultrapassar a flecha limite.

Tabela 14 - Comparativo de vigas da cobertura.

VIGAS	Estrutura modificada						
	Seção (cm)	As inferior	As superior	Asw	As de pele	Flecha (cm)	Flecha limite (cm)
V50	15 x 70	6 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 25	2x3 ϕ 8.0	-2.5	3,25
	15 x 70	5 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 25	2x2 ϕ 10.0	-2.28	3,25
V51	15 x 70	6 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 25	2x2 ϕ 10.0	-2.21	3,25
	15 x 70	6 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 25	2x2 ϕ 10.0	-2.03	3,25
V52	15 x 70	6 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 25	2x2 ϕ 8.0	-2.99	3,25
	15 x 70	4 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 25	2x2 ϕ 8.0	-1.88	3,25
	15 x 70	3 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 25	2x2 ϕ 8.0	-1.26	3,25
	25 x 75	4 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 15	*	-2.29	3,25
	25 x 75	7 ϕ 12.5	*	ϕ 5.0 c/ 15	*	-3.23	3,25

Fonte 67 - Elaborado pelo autor.

Conforme os valores obtidos na análise da estrutura, as vigas 4 e 52 precisam reforço estrutural para garantir a segurança, devido às flechas serem excessivas. Pode ser feito reforço através do aumento da seção por encamisamento, perfis metálicos ou por outro método mais conveniente.

O subdimensionamento das vigas pode levar a um aumento nos custos da obra, uma vez que pode ser necessário realizar reparos e reforços na estrutura. Como afirma MELHADO (2016), a economia inicial no dimensionamento inadequado de vigas pode se transformar em gastos exorbitantes com recuperação e reparo de patologias estruturais.

6 PROPOSTA DE INTERVENÇÃO

6.1 Reforço estrutural

6.1.1 Aumento da seção de concreto/Encamisamento

A recuperação de vigas de concreto armado por meio do aumento da seção de concreto, conhecida como encamisamento, é uma técnica fundamental na engenharia civil, que desempenha um papel crucial na preservação e no reforço de estruturas de concreto ao redor do mundo. Em face dos desafios impostos pelo envelhecimento de infraestruturas, a necessidade de aumentar a capacidade de carga de vigas danificadas ou acomodar cargas adicionais em estruturas existentes tornou o encamisamento uma solução eficaz e econômica.

Reforçar vigas de concreto armado através do aumento da seção de concreto, ou encamisamento, é uma técnica com várias vantagens e desvantagens, que se adequa a diferentes casos, dependendo das necessidades da estrutura e das condições específicas.

Entre as principais vantagens podemos destacar:

- Aumento da capacidade de Carga: O encamisamento aumenta a seção transversal da viga, melhorando sua capacidade de suportar cargas. Isso é particularmente útil quando a estrutura precisa ser reforçada para acomodar cargas adicionais ou quando a capacidade de carga original foi comprometida devido a danos;
- Restauração da integridade estrutural: vigas com fissuras, corrosão das armaduras ou danos estruturais podem ser restauradas à sua capacidade original;
- Economia de tempo e custo: comparado à demolição e reconstrução, o encamisamento é geralmente mais rápido e econômico;
- Mínimo impacto operacional: A execução do encamisamento não exige a interrupção total do uso da estrutura, o que pode ser fundamental em aplicações comerciais ou de infraestrutura;
- Os materiais e mão de obra utilizados na execução são de fácil acesso, garantindo um baixo custo.

Entre as desvantagens estão:

- Ganho de Peso: O aumento da seção com concreto adiciona peso à estrutura, o que pode ser um problema em estruturas antigas ou já sobrecarregadas;

- Limitações de Espaço: Em alguns casos, pode não haver espaço suficiente para aumentar a seção da viga;
- Compatibilidade com a Estrutura Existente: É importante garantir que o novo concreto seja compatível com o antigo para evitar problemas de aderência e fissuração;
- Pode ocorrer a retração do concreto.

O aumento da seção da viga pode ser feito de forma parcial ou total, no aumento parcial é retirado uma parte de concreto da viga, a fim de que as armaduras fiquem expostas para que o concreto a ser utilizado possa envolver as armaduras garantindo uma boa aderência. No aumento total da seção, é necessário um aumento considerável da seção de concreto aumentando também o número de barras de aço.

6.1.2 Execução do reforço

Para que ocorra a aderência entre o concreto da viga e o novo concreto a ser aplicado no reforço é necessário que sejam utilizadas matérias de alta resistência e aderência devidas as propriedades e idades dos matérias serem diferentes. Nesse procedimento o graute é um dos matérias mais utilizado para esse tipo de procedimento, sendo um microconcreto de alta resistência e fluidez.

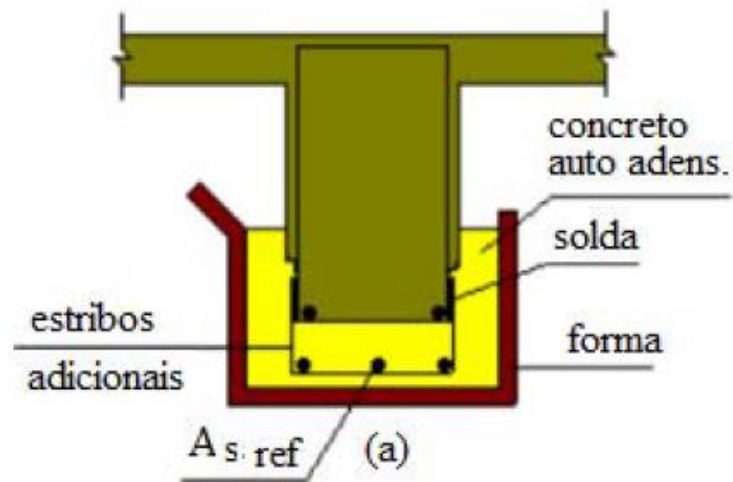
São necessários alguns cuidados no preparo da superfície que irá receber o reforço.

- Remover o material que está deteriorado;
- É necessária uma camada de reforço mínima de 75 mm;
- As armaduras devem ser cuidadosamente tratadas contra a corrosão;
- Uso de superplastificante para diminuir a quantidade de água, garantindo assim maior resistência;
- O concreto deve ser fluido para ocorrer o correto adensamento.

6.1.3 Tipos de encamisamento com aumento de seção

Na figura 53 é mostrado como é feito reforço parcial, com o concreto lançado em forma com formato de cachimbo.

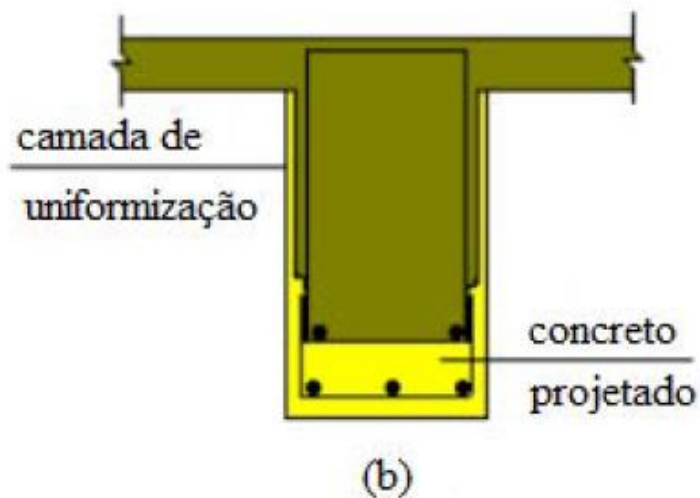
Figura 53 - Reforço parcial, em forma de cachimbo.



Fonte 68 - Piancastelle (1977).

Na figura 54 é mostrado como é feito o reforço com concreto projetado para o aumento da seção.

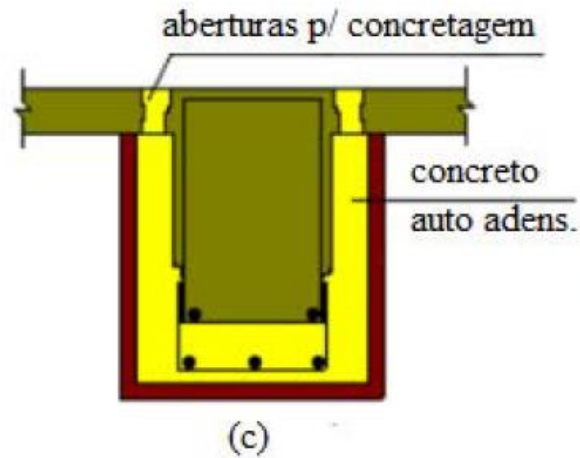
Figura 54 - Reforço com concreto projetado.



Fonte 69 - Piancastelle (1977).

Na figura 55 é mostrado como é feito o reforço com encamisamento total através da injeção da argamassa por um furo feito na laje.

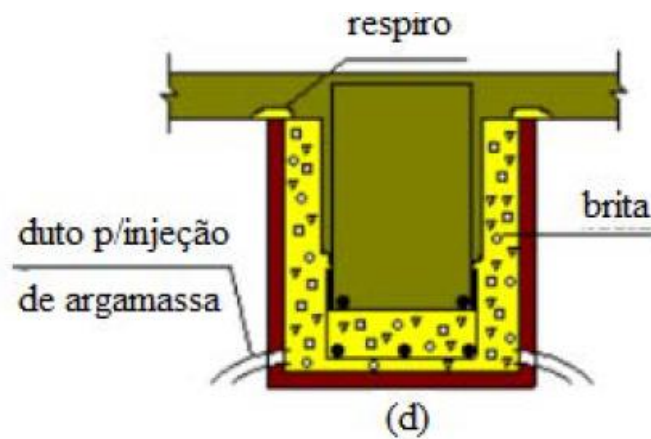
Figura 55 - Encamisamento por injeção de argamassa.



Fonte 70 - Piancastelle (1977).

Na figura 56 é mostrado como é feito o reforço através do encamisamento total, através da injeção de argamassa sobre uma camada de brita.

Figura 56 - Encamisamento total.



Fonte 71 - Piancastelle (1977).

Na figura 57 pode ser observado a execução do reforço com encamisamento parcial, são feitos vários furos na parte comprimida da viga para poder posicionar os estribos, em seguida os furos são preenchidos com graute e são posteriormente posicionadas as demais armaduras e as formas.

Figura 57 - Posicionamento dos estribos e armaduras longitudinais.



Fonte 72 - https://www.youtube.com/watch?v=nPZZ_dMGjks.

Na figura 58 ocorre o posicionamento das armaduras longitudinais e os estribos para o encamisamento total da viga, as armaduras envolvem toda a viga.

Figura 58 - Preparo de uma viga para a execução do reforço.



Fonte 73 - <https://docplayer.com.br/59500664-Recuperacao-de-estruturas.html>.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo principal verificar quais as principais causas que contribuíram para o aparecimento de fissuras nas vigas da edificação. Através da metodologia adotada foi possível atingir os objetivos de forma satisfatória, mostrando alguns aspectos relevantes que causaram a fissuração.

Diante da análise comparativa dos resultados observados nas tabelas 11, 12, 13 e 14 podemos constatar que as seções das vigas que apresentam problemas de fissuração foram subdimensionadas, ao utilizar seções menores que o necessário para suportar a cargas atuantes nas vigas, resultando em uma taxa de armadura maior que a recomendada pela NBR 6118/2014. Através do estudo não foi possível verificar a estabilidade da estrutura quanto ao Estado limite ultimo devido não ter sido possível identificar a área de aço das armaduras longitudinais e transversais empregadas nas vigas.

Um fator determinante para uma melhor compreensão das causas será a escarificação das vigas para assim obter a área de aço empregada em cada uma das vigas. Através desse procedimento será possível determinar se a área de aço utilizada é suficiente para resistirem aos esforços solicitantes e atestar se a estrutura é realmente segura.

Através das inspeções realizadas com o registro fotográfico destas sendo apresentado neste trabalho, demonstrou uma diversidade de fissuras que estão presentes na estrutura que evoluíram ao longo do tempo, aumentando em tamanho e quantidade. Diante da revisão bibliográfica e das informações encontradas na literatura, conclui-se que as vigas apresentam sérios riscos devido aos tipos de fissuras encontradas estarem relacionadas diretamente ao mal dimensionamento das vigas, aos esforços de flexão e cortante ou a falhas durante a execução.

Segundo Lungisansilu, Felix e Mendes (2021), com uma necessidade de maior taxa de armadura conclui-se que o processo de aberturas de fissuras se torna menor, onde uma densidade maior de armadura, possibilitaria uma menor abertura de fissuras. Diante disso, pode ter ocorrido alguma falha durante a execução das vigas ou foi utilizado uma área de aço menor que a necessária.

Vale ressaltar também que através da análise foi possível identificar flechas excessivas nas vigas, indicando assim que deveriam ter sido adotadas seções maiores ou outro tipo de tecnologia durante a concepção da estrutura a fim de evitar problemas com flechas excessivas.

Considerando esse aspecto e a quantidade de vigas com flechas excessivas, a estrutura não atende ao Estado Limite de Serviço.

Outro aspecto importante a ser considerado, é a abertura das fissuras de 0,3 mm que foram encontradas, apesar de a edificação está em um local de baixa agressividade, é necessário que sejam feitas algumas intervenções para não haver o contato das armaduras com o meio externo. Devido aos sérios riscos que o contato do aço com agentes agressivos pode causar através da oxidação das armaduras, resultando assim na perda de seção das barras de aço e o aumento da fissuração nas vigas.

Avaliando por meio dos resultados obtidos, através da inspeção, das análises e do cálculo estrutural, tem-se que a estrutura precisa de reforço em algumas vigas, devido aos resultados sinalizarem que as seções e armaduras empregadas apresentam um potencial risco a segurança da estrutura. Os resultados evidenciam a importância de que seja feita uma recuperação estrutural a fim de garantir maior durabilidade e segurança da edificação.

REFERÊNCIAS

- ABNT, NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto** - Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.
- ABNT, NBR. 14931: **Execução de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
- ABNT. NBR 9575:2010. **Impermeabilização - Seleção e Projeto**. Rio de Janeiro: ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.
- AMORIM, A. A. **Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado aparentes**. Belo Horizonte, 2010. Monografia (Graduação) Curso de Engenharia Civil, Universidade federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- ANDRADE, A. B. **Cura do Concreto**. São Paulo: PINI, 2001.
- ARAÚJO, M. F. **Aspectos práticos de projeto e dimensionamento de estruturas de concreto armado**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- ARIVABENE, A. C. **Patologias em estruturas de concreto armado**: Estudo de caso. Revista Especialize On-line IPOG, Goiânia, v. 8, n. 13, p. 1-14, dez. 2015.
- BAUER L.A.F. **Materiais de construção**, 5ª edição. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2004.
- BEER, F. P. e Johnston, E. R. **Mecânica Vetorial para Engenheiros: Estática**. 8ª ed. McGraw Hill. Texas: Texas Tech University, 2010.
- CALDAS, ASSUNÇÃO, Antônio Jorge. **Abertura de fissuras em vigas de concreto armado**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, 1997.
- CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA CIVIL, 2012, Santa Maria, VARGAS, SANTA. Santa Maria. **Influência da cura do concreto na retração plástica e nas fissuras**, 2012.
- COMITÊ ACI 224. **Controle de fissuração em estruturas de concreto** (No. 224.1R-93). Farmington Hills: Instituto Americano do Concreto, 1998.
- DANTAS, M. M. C. **Controle de qualidade em estruturas de concreto armado**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- DA SILVA, Amanda Fernandes Pereira et al. **Fissuração no Concreto Armado: Possíveis Causas e Técnicas de Resolução**. São Paulo: Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 12, p. 96423-96735, 2020.
- DIAS, C. L.; HELENE, P. R. L. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2012.
- Fédération Internationale du Béton. **Structural Concrete Textbook on behavior, design and performance**, Segunda edição. Lausanne: Fédération Internationale du Béton, 2010.
- FERREIRA, A. L. A. **Qualidade do concreto armado**. Tese (Doutorado) Curso de Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- HANSON, N. W. **Shear reinforcement - its need, suitability and economics**. ACI Journal Proceedings, Farmington Hills, v. 54, n. 7, p. 1-16, 1958.
- LIMA, R. P. **Cura do Concreto: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.
- LUNGISANSILU, Rodrigue Totolo; FELIX, Roberta Medici; MENDES, Luiz Carlos. **Análise de fissuras em vigas de concreto armado**. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 2, p. 18003-18016, 2021.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2006.

- MELHADO, Silvio Barrantino. **Dimensionamento de vigas de concreto armado**: aspectos técnicos e econômicos. São Paulo: Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Civil, São Paulo, 2016.
- MINDESS, S., Young, J.F., & Darwin, D. Porto Alegre: **Concreto. Pearson Educação, 2003.**
- MONTEIRO, J. P. **Dimensionamento de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 2018.
- MONTEIRO, M. C. **Manual de construção de edifícios**: guia para arquitetos, engenheiros e estudantes. São Paulo: Editora PINI Ltda, 2018.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª. Ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 2003.
- NEVILLE, A.M. **Propriedades Do concreto**. Porto Alegre: Pearson Educação, 2011.
- OLIVEIRA, J. **Patologia das construções**: manifestações patológicas em edifícios. 5ª ed. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2012.
- RUSH, S. W. **Cracking in Reinforced Concrete Beams**. ACI Structural Journal, Farmington Hills, v. 78, n. 2, p. 122-128, 1981.
- SOUTO, A. L. **Controle de qualidade na execução de estruturas de concreto armado**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, v. 14, n. 4, p. 347-354, 2017.
- SILVA, J. C. **Prevenção de patologias em estruturas de concreto armado**. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- SILVA, R. C. M. **Estudo da Armadura Mínima em Vigas de Concreto Armado**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- SUSSEKIND, José Carlos. **Curso de concreto**, vol. 2, 2ª Ed. Rio de Janeiro: Ed. Globo, 1985.
- VARGAS, Leonardo Borges. **Avaliação das ações térmicas e de retração em uma edificação em paredes de concreto moldadas in loco**. 2021. Cidade. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.
- VIEIRA, Mylene de Melo. **Patologias em estruturas de concreto**. Araraquara: Universidade de Araraquara (UNIARA), 2016.
- WIGHT, James. K. **Reinforced Concrete - Mechanics and Design**. 7ª. Chicago: Ed. Pearson, 2016.
- WOODSON, R. D. **Concrete Structures: Protection, Repair and Rehabilitation**. New York: McGraw-Hill, 2012.

