



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



RODRIGO LINO DE PÁDUA BORGES

**ANÁLISE CRÍTICA DE PROJETOS ESTRUTURAIS E A SOLUÇÃO DE
REFORÇO ESTRUTURAL EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO:
ESTUDO DE CASO EM UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM UBERLÂNDIA-MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Uberlândia – MG

2024

**ANÁLISE CRÍTICA DE PROJETOS ESTRUTURAIS E A SOLUÇÃO DE
REFORÇO ESTRUTURAL EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO:
ESTUDO DE CASO EM UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM UBERLÂNDIA-MG**

Rodrigo Lino de Pádua Borges (1), Gregório Sandro Vieira (2)

(1) Graduando, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil

(2) Professor Doutor, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil

RESUMO

A integridade estrutural de edifícios é um fator crucial para garantir a segurança e durabilidade das construções. Falhas no projeto ou na execução de obras podem comprometer seriamente a estabilidade das estruturas, exigindo intervenções corretivas e reforços. Este artigo apresenta um estudo de caso de um edifício residencial de alto padrão que manifestou diversas patologias estruturais durante sua construção. Foram observadas fissuras significativas em lajes, vigas e alvenarias, causadas por falhas no dimensionamento dos elementos e omissões em relação às ações de carga e vento. A análise técnica indicou deformações excessivas, fissuração e problemas de vibração estrutural, comprometendo tanto a segurança quanto a funcionalidade do edifício. A solução envolveu uma revisão detalhada do projeto, seguida da aplicação de reforços estruturais definidos com base em análises numéricas, visando garantir a integridade e durabilidade da edificação a longo prazo.

Palavras-chave: patologias estruturais, concreto armado, reforço estrutural.

ABSTRACT

The structural integrity of buildings is a crucial factor in ensuring the safety and durability of constructions. Design or construction execution failures can severely compromise the stability of structures, requiring corrective interventions and reinforcements. This article presents a case study of a high-end residential building that exhibited various structural pathologies during its construction. Significant cracks were observed in slabs, beams, and masonry, caused by errors in the dimensioning of elements and omissions regarding load and wind actions. The technical analysis indicated excessive deformations, cracking, and structural vibration issues, compromising both the safety and functionality of the building. The solution

involved a detailed project review and the application of structural reinforcements, aiming to ensure the building's long-term integrity and durability.

Keywords: *structural pathologies, reinforced concrete, structural reinforcement.*

INTRODUÇÃO

No contexto da engenharia civil, preservar a integridade estrutural de edifícios é fundamental para assegurar a segurança e a longevidade das construções. Infelizmente, é comum nos depararmos com relatos alarmantes na mídia sobre edifícios que são submetidos à interdição e evacuação devido a problemas estruturais. De acordo com Michelly Oda (G1, 2024) um caso recente aconteceu em Montes Claros, onde um prédio de 18 andares foi evacuado em razão do comprometimento de diversos pilares. O corpo de bombeiro evacuou o lugar após um morador sentir o prédio tremer e ouvir um estrondo. Um dos pilares estava com a armadura exposta, com indícios de flambagem e evidências de barras rompidas, ressaltando a gravidade do problema.

Nesse cenário, múltiplos fatores podem ser identificados como potenciais responsáveis pelo comprometimento estrutural de um edifício. Falhas na execução das técnicas construtivas como problemas na colocação da armadura e durante o processo de concretagem podem contribuir significativamente para a fragilização dos pilares e demais elementos estruturais (Silva, 2021). Ademais, não se pode desconsiderar possíveis falhas no projeto estrutural como uma das causas potenciais desses problemas, daí a importância de compreender e abordar todas essas questões para garantir a segurança e a confiabilidade das construções civis.

Este trabalho se propõe a apresentar os desafios enfrentados em uma obra que, devido ao seu projeto estrutural, manifestou falhas que exigiram intervenções de reforço. Através de um estudo de caso detalhado, serão examinadas as causas dos problemas estruturais encontrados e as soluções adotadas para sua correção, destacando-se o papel do reforço estrutural na restauração da estabilidade e na prevenção de futuras complicações. Este estudo visa não apenas compreender os aspectos técnicos envolvidos, mas também extrair lições relevantes para o aprimoramento dos processos de projeto e execução de obras similares.

1- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitos dos problemas na construção civil podem ser evitados ainda na fase de planejamento, por meio de uma análise criteriosa e da compatibilização dos projetos. A compatibilização, ao integrar e ajustar projetos arquitetônicos, estruturais e complementares,

minimiza conflitos e imprevistos durante a execução, promovendo maior eficiência e economia. Nesse contexto, a Avaliação Técnica de Projeto (ATP) desempenha um papel crucial, garantindo conformidade com normas vigentes e assegurando a qualidade técnica das soluções estruturais. Com a evolução contínua na forma de projetar, é essencial atender às demandas cada vez maiores por projetos arquitetônicos mais arrojados, sustentáveis e econômicos (AECWEB, 2022).

Não há uma norma específica para Análise Técnica de Projeto, porém a ABNT NBR 6118:2023 cita uma série de boas práticas da engenharia civil, em questões como a avaliação da conformidade de projeto, estabilidade e segurança à ruína, estado limite último (ELU), e como deve ser o comportamento em serviço, estado limite de serviço (ELS), da estrutura a ser construída.

1.1- Patologias

Quando os devidos cuidados não são observados ou problemas identificados no estudo da Avaliação Técnica de Projeto (ATP) são negligenciados, surgem patologias nas estruturas. Assim como na medicina, onde a prevenção é a melhor abordagem, o mesmo princípio se aplica à engenharia civil. Um projeto bem planejado e executado é sempre mais eficiente e econômico, evitando falhas futuras. No caso de surgirem patologias, é crucial diagnosticar corretamente suas causas e iniciar o processo de recuperação com profissionais qualificados, garantindo assim a durabilidade e segurança da obra (Cardoso, 2018).

Essas patologias são comumente encontradas na estrutura em forma de fissuras. As fissuras são manifestações patológicas que se caracterizam como sendo superficiais ou profundas, em estrutura de concreto ou alvenarias. Ao identificar fissuras em uma estrutura de concreto, é essencial mapear e classificá-las (Pereira, 2012). Essa classificação permite identificar possíveis problemas na estrutura, como cisalhamento causados por forças cortantes ou torção devido a momentos. Além disso, ajuda a avaliar a presença de flexão nas peças estruturais, que pode gerar deformações quando não adequadamente projetada ou dimensionada. Com as fissuras classificadas e o mapeamento em mãos, pode-se iniciar o processo de identificação de suas causas, o que permite definir as metodologias adequadas para os trabalhos de recuperação ou reforço, conforme a necessidade da situação. É fundamental que esse processo seja conduzido com atenção e competência, uma vez que uma análise inadequada pode resultar na aplicação de métodos de recuperação ou reforço ineficazes. Se as causas não forem devidamente eliminadas, qualquer tentativa de correção será em vão, e o problema poderá reaparecer ou até se agravar (Souza e Ripper, 1998).

1.2- Deficiências de projeto

As falhas ocorridas em projetos estruturais, que influenciam diretamente na formação de fissuras, podem ser variadas, assumindo configurações específicas conforme o tipo de esforço ao qual as diferentes peças estruturais estão sujeitas. Por exemplo, em lajes com insuficiência de armadura para momentos negativos, as fissuras costumam aparecer especialmente nos cantos devido a flexão que o elemento está submetido, o que confirma o tipo de esforço atuante na estrutura. Da mesma forma, vigas submetidas a esforços cortantes e de torção podem apresentar fissuras inclinadas ou em disposição diagonal, indicando a sobrecarga e a deformação desses elementos (Souza e Ripper, 1998). Tais fissuras não só indicam o tipo de falha presente, mas também fornecem informações essenciais para a análise e a correção adequadas do problema.

O cálculo de uma estrutura é feito de forma a assegurar que ela permaneça dentro dos limites aceitáveis tanto para o ELU quanto para o ELS. Durante o dimensionamento, além dos esforços estáticos (carga permanente e acidental), são consideradas também ações dinâmicas, como vibrações devido ao trânsito de pessoas, máquinas ou fenômenos naturais como vento (ABNT NBR 6118:2023). Esses esforços são analisados por meio de métodos de cálculo estrutural, como o método dos elementos finitos, onde as diferentes solicitações são simuladas e as deformações e tensões são verificadas. Dessa forma, o engenheiro pode identificar potenciais regiões críticas, como os cantos de lajes ou áreas sujeitas a torção em vigas, e reforçar adequadamente com armaduras, evitando o surgimento de fissuras indesejadas.

Os ELU e ELS desempenham um papel fundamental na prevenção das fissuras mencionadas, garantindo tanto a segurança quanto a durabilidade da estrutura. No ELU, o projeto estrutural é desenvolvido para evitar o colapso, assegurando que os esforços máximos suportados pelos materiais, como flexão, cortante, normal e torção, não ultrapassem suas capacidades. Nesse sentido, a análise no ELU visa dimensionar adequadamente as armaduras e os elementos estruturais, prevenindo falhas como as fissuras em lajes e vigas citadas. Já no ELS, o foco está no comportamento da estrutura sob condições normais de uso, onde são verificados os limites de deformações e fissuras para evitar danos estéticos e garantir o conforto dos usuários (ABNT NBR 6118:2023). Por exemplo, o comportamento dinâmico das estruturas, como vibrações excessivas em pisos ou vigas, deve ser controlado dentro do ELS para evitar desconforto ou danos a elementos não estruturais.

Ao identificar os problemas mencionados, como fissuras resultantes de falhas estruturais, torna-se essencial uma avaliação técnica cuidadosa. Caso se constate que algum

critério do ELU ou ELS tenha sido negligenciado no dimensionamento ou execução, é indispensável a realização de intervenções corretivas. Essas intervenções visam restabelecer a segurança e o desempenho da estrutura, garantindo sua adequação aos esforços a que está submetida. Assim, soluções de reforço e recuperação podem ser aplicadas de forma a corrigir as deficiências e assegurar a durabilidade da construção.

1.3- Reforço estrutural

Os conceitos de recuperação e reforço são estreitamente conectados. Recuperação refere-se ao restabelecimento da capacidade portante original de um elemento estrutural, enquanto o reforço implica no aumento dessa capacidade (Araldi, 2013). Para ambos os processos, é fundamental que, ainda na fase de projeto, sejam selecionados cuidadosamente tanto a técnica quanto os materiais mais adequados, a fim de assegurar a vida útil, o desempenho e a durabilidade desejados para a estrutura (Araldi, 2013).

Em algumas situações, a escolha da técnica de reforço e do material mais adequado torna-se desafiadora devido à exposição dos edifícios a diferentes agentes agressivos do ambiente. Além disso, há a necessidade de compatibilizar materiais, controlar o peso adicional e superar grandes vãos. Portanto, é essencial selecionar materiais que ofereçam as propriedades adequadas para garantir o bom desempenho da estrutura, considerando as exigências específicas a que será submetida, a fim de assegurar tanto a economia com manutenção quanto a durabilidade do reparo (Zucchi, 2015).

Atualmente, diversas técnicas estão disponíveis para o reforço de estruturas, incluindo o reforço com concreto armado, conhecido como encamisamento, o uso de perfis metálicos e a aplicação de materiais poliméricos reforçados com fibras (PRF).

O reforço com perfis metálicos, também denominado "reforço com adição de armaduras exteriores", utiliza elementos metálicos, como chapas ou perfis, que são fixados à estrutura com adesivo epóxi, promovendo a união entre o aço e o concreto, ou com o auxílio de chumbadores parabolt (Zucchi, 2015). Essa técnica, que envolve a fixação de chapas de aço na superfície do elemento a ser reforçado, permite uma execução rápida e sem grandes aumentos de seção. No entanto, a colagem das chapas dificulta a detecção de fissuras no elemento, que poderiam indicar falhas na capacidade estrutural, além de ocultar sinais de corrosão. Ademais, tanto as chapas metálicas, devido à sua espessura reduzida, quanto o adesivo epóxi apresentam baixa resistência a altas temperaturas, o que aumenta o risco de colapso em situações de incêndio (Reis, 1998).

Os polímeros reforçados com fibras (PRF), ou *fibre reinforced polymers* (FRP), têm despertado grande interesse entre pesquisadores que atuam na área de engenharia estrutural. A resistência e rigidez desses compósitos dependem principalmente do tipo de fibra, da matriz polimérica e da interface entre ambos. Cada um desses componentes precisa possuir características específicas que garantam o desempenho adequado do compósito (Beber, 2003).

A técnica de reforço por aumento de seção, também conhecida como encamisamento, envolve a adição de concreto novo e armadura à seção original da estrutura. Essa solução é amplamente utilizada devido ao seu custo relativamente baixo em termos de materiais e mão de obra, e pode ser executada com concreto projetado. No entanto, a principal desvantagem é a interferência arquitetônica causada pelo aumento da seção dos elementos reforçados e, em alguns casos, o longo tempo de espera até a liberação da estrutura para uso. Reis (2001) propõe o uso de concreto de alto desempenho como alternativa ao convencional, uma vez que permite espessuras menores, minimizando alterações nas dimensões dos elementos reforçados.

O êxito do reparo estrutural depende da boa aderência entre o concreto novo e o existente, bem como da eficiente transferência de tensões entre eles. A incompatibilidade entre esses materiais pode resultar em falhas no reparo, especialmente devido às diferenças de deformação e retração. É fundamental garantir a limpeza adequada das armaduras, removendo completamente os produtos de corrosão antes da aplicação do novo material. Além disso, todo o concreto deteriorado deve ser retirado, especialmente na área ao redor das armaduras nas regiões afetadas pela corrosão (Reis, 2001).

2- METODOLOGIA DE PESQUISA

2.1- Estudo de caso

O estudo foi realizado com base na análise de um edifício localizado no município de Uberlândia, em Minas Gerais. Situado em uma região nobre da cidade, o empreendimento é considerado de alto padrão. Trata-se de um edifício residencial e comercial com 22 pavimentos, dos quais 21 são pavimentos tipo, cada um contendo quatro apartamentos com uma área média de 130 m². Além disso, o edifício possui uma cobertura que inclui piscina e outros itens de recreação. No térreo, há quatro lojas com uma área média de 80 m² cada, além de um salão de festas e outras áreas comuns. O projeto também inclui dois pavimentos subterrâneos destinados a garagens. Quando finalizado, o edifício terá aproximadamente 18.000 m² de área construída.

2.2- Avaliação do projeto

Em 2021, a pedido da construtora, seguindo as boas práticas de engenharia previstas na norma ABNT NBR 6118:2023, foi solicitada uma Avaliação Técnica de Projeto (ATP), uma vez que foram identificadas não conformidades no projeto de estruturas. Após a análise as falhas detectadas foram confirmadas e foram sugeridas alterações no projeto para possibilitar a continuidade da obra, que, à época, estava na fase de construção do segundo pavimento.

2.3- Problemas encontrados

Posteriormente, começaram a surgir anomalias no comportamento estrutural do edifício. Essas anomalias tornaram necessário o escoramento emergencial das lajes do primeiro pavimento onde foram observados grandes deslocamentos nas lajes de maior vão, indicando que o problema poderia ser mais grave. Na Figura 1 – b é apresentado um deslocamento de 10 centímetros medido a partir de uma linha de nível traçada sobre a laje. Situações semelhantes foram identificadas em outros pontos nas lajes do primeiro pavimento.

Figura 1 – Lajes do primeiro pavimento

a) Escoramento na laje 1º pavimento



b) Deslocamento na laje 1º pavimento



Fonte: Autor (2023)

Foram observadas fissuras de grande abertura em lajes do 1º pavimento (Figura 2), em diferentes posições e por todo o pavimento, fissuras longitudinais concentradas nas regiões de maior solicitação, especialmente próximas aos apoios, além de sua disposição perpendicular ao eixo das maiores tensões de flexão. A forma e o padrão das fissuras indicam que as lajes não foram dimensionadas adequadamente para resistir aos esforços de flexão, resultando em aberturas excessivas.

Figura 2 – Fissuras nas lajes do 1º pavimento característica de subdimensionamento a momento fletor

a) Fissura na laje 1º pavimento



b) Fissura na laje 1º pavimento



Fonte: Autor (2023)

Além de fissuras nas lajes, foram identificadas fissuras em vigas. Nesse caso, fissuras em viga próxima ao pilar regularmente atribuídas ao subdimensionamento, que leva a um cisalhamento por força cortante, como visto da Figura 3.

Figura 3 – Fissura em viga do 1º pavimento característica de cisalhamento por força cortante



Fonte: Autor (2023)

Também foram registradas fissuras em vigas que recebiam a carga de outras vigas (Figura 4), provenientes de cisalhamento por torção, também consequência do subdimensionamento. Nesse caso foi observado um padrão de fissuração em forma de "X" em ambos os lados da viga, com fissuras orientadas em direções opostas.

Figura 4 – Fissura em viga do 1º pavimento característica de cisalhamento por torção



Fonte: Autor (2023)

Fissuras também se abriram com o passar do tempo ao longo da alvenaria (Figura 5) e posteriormente no reboco (Figura 6). Esse evento foi observado no 1º e 2º pavimentos, esses, que foram feitos antes dos reforços sugeridos. Fissuras que acompanham o contorno da junta da argamassa, frestas abertas entre o bloco cerâmico e os pilares, vigas e lajes e fissuras horizontais no reboco também foram observadas.

Figura 5 – Fissuras em alvenarias do 1º e 2º pavimentos

a) Fissura acompanhando a argamassa



b) Fresta entre a alvenaria e o pilar



Fonte: Autor (2023)

No caso do vínculo entre a estrutura e o bloco cerâmico, mesmo utilizando a tela de amarração prevista em norma houve a fissuração, isso mostra o quão elevado foi a movimentação do edifício.

Figura 6 – Fissuras em reboco do 1º e 2º pavimentos

a) Fissuras horizontais no reboco



b) Fissuras horizontais no reboco



Fonte: Autor (2024)

2.4- Análise estrutural

Com o objetivo de confirmar o diagnóstico de não conformidades e identificar soluções de reforço para os elementos já executados, em 2022, a Empresa A, responsável pelo projeto de reforço estrutural, realizou uma nova análise do projeto estrutural para validar o diagnóstico duplo existente.

Após uma análise detalhada dos elementos críticos, foi recomendada a paralisação imediata da obra até que pilares, vigas de transição e fundações fossem devidamente reforçados. Naquele momento, a estrutura do edifício já havia sido erguida até o 13º pavimento.

Para a análise estrutural e a obtenção de esforços, foi empregado um modelo de grelhas planas acoplado a um pórtico espacial como visto na Figura 7. No caso das vigas de transição, devido à sua desproporção em relação às dimensões de determinados pilares, elaboraram-se modelos complementares utilizando elementos finitos para aprimorar a precisão dos resultados (Figura 7 – d).

Conforme identificado durante a ATP com embasamento na ABNT NBR 6123:2023, o projeto estrutural não considerou as ações de vento, o que resultou na ausência de momentos declarados nas fundações, ou seja, esses esforços não foram levados em conta no dimensionamento das fundações.

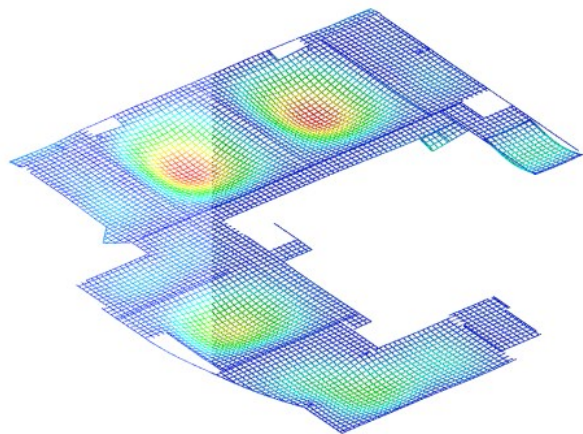
Dessa forma, o modelo espacial adotado nas análises foi articulado nos pilares que não apresentavam condições adequadas para absorver os momentos provenientes de cargas horizontais. Isso permitiu a redistribuição dos esforços e reduziu a necessidade de reforços nas fundações.

Figura 7 – Modelos utilizados para a análise estrutural

a) Perspectiva tridimensional do modelo de pórtico espacial

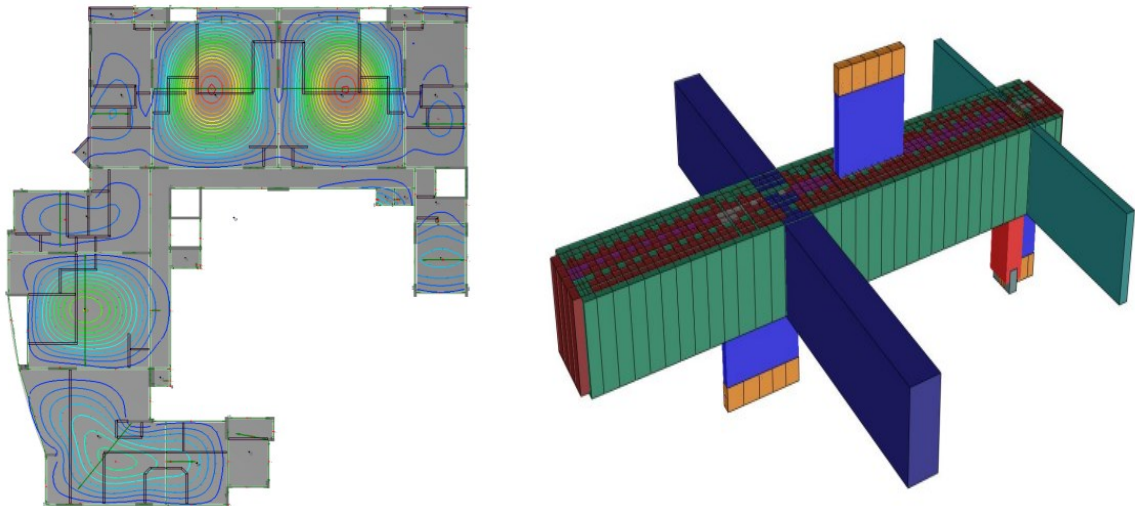


b) Perspectiva de deslocamento da grelha do pavimento tipo (amplificada)



c) Curvas de isodeslocamento da grelha do pavimento tipo

d) Modelo de elementos finitos de viga de transição para análise localizada



Fonte: Empresa A (2023)

2.5- Verificação de elementos quanto ao Estado Limite Último (ELU)

As seções críticas dos elementos estruturais foram avaliadas por meio do cálculo da taxa de utilização, que corresponde à relação entre os esforços atuantes e a capacidade resistente. Esse parâmetro, quando inferior a 100%, indica que os coeficientes normativos de segurança não sofreram redução.

A verificação foi realizada apenas nos elementos mais críticos, com o objetivo de direcionar tanto o desenvolvimento do projeto quanto a execução dos reforços necessários.

A Tabela 1 a seguir contém as taxas de utilização de algumas vigas de transição analisadas:

Tabela 1 – Taxas de utilização das vigas de transição do pavimento térreo quanto ao momento fletor

Dados										Estado Limite último				
										γ_s		γ_c		γ_r
Elemento	Seção	MSk (tf.m)	fck (kgf/cm ²)	fyk (kgf/cm ²)	bw (cm)	d (cm)	n	ϕ (mm)	As (cm ²)	MSd (tf.m)	x (cm)	x/d	MRd (tf.m)	Taxa
										1,15		1,4		1,4
VT8	Vão 1	765	300	5000	200	135	15	25	73,63	1071	11,0	0,08	418	256%
VT21	Vão 1	262	300	5.000	200	135	15	25	73,63	367	11,0	0,08	418	88%
	Apoio 2	364	300	5.000	200	135	19	25	93,27	510	13,9	0,10	525	97%
	Apoio 3	197	300	5.000	200	135	9	25	44,18	276	6,6	0,05	254	108%
VT15	Vão 1	423	300	5.000	100	135	28	25	137,44	592	41,0	0,30	708,71	84%
VT23	Apoio 2	130	300	5.000	150	135	6	25	29,45	182	5,9	0,04	169,87	107%
	Vão 2	528	300	5.000	150	135	29	25	142,35	739	28,3	0,21	765,45	97%
VT31	Vão 1	499	300	5.000	80	135	13	25	63,81	699	23,8	0,18	348,14	201%
VT44	Apoio 1	238	300	5.000	50	135	6	25	29,45	333	17,6	0,13	164	203%
	Vão 1	272	300	5.000	50	135	13	25	63,81	381	38,1	0,28	332	115%
	Apoio 2	236	300	5.000	50	135	8	25	39,27	330	23,4	0,17	214	154%
	Vão 2	96	300	5.000	50	135	12	25	58,90	134	35,2	0,26	310	43%
	Apoio 3	402	300	5.000	50	135	6	25	29,45	563	17,6	0,13	164	343%

Fonte: Empresa A (2023)

As taxas de utilização destacadas em vermelho indicam elementos que estão sendo sobrecarregados, o que pode resultar em deformações excessivas, fissuração e, em casos mais críticos, até mesmo no colapso estrutural. Uma situação crítica é a da viga VT44, que está operando com uma carga 343% superior à sua capacidade projetada, tornando-se um ponto de extrema vulnerabilidade na estrutura.

2.6- Verificação de elementos quanto ao Estado Limite de Serviço (ELS)

Os resultados da verificação quanto ao Estado Limite Último (ELU) indicam deficiências significativas no projeto estrutural, justificando, portanto, os reforços estruturais. Essas evidências sugerem um risco elevado à segurança da edificação. No entanto, além dos problemas relacionados ao ELU, é importante destacar que a estrutura também apresentava graves falhas em relação ao Estado Limite de Serviço (ELS), o que compromete a funcionalidade e a utilização segura do empreendimento.

Para a verificação do Estado Limite de Serviço foram verificados os deslocamentos (flechas) em cada laje do pavimento tipo bem como foi realizada uma análise dinâmica do pavimento buscando encontrar as frequências das vibrações da estrutura.

Os resultados da verificação de deslocamentos (flechas) se encontram na Tabela 2 a seguir e indicam grande quantidade de elementos com flechas excessivas.

Tabela 2 - Verificação de deslocamentos das lajes do pavimento tipo

Laje	Vão da Laje L (cm)	Deslocamento Calculado f (cm)	Deslocamento Limite f.lim (cm)	Relação Deslocamento Calculado sobre Deslocamento Limite f/f.lim
L1	100	-0,35	0,4	-0,87
L2	100	-0,42	0,4	-1,04
L3	100	-0,46	0,4	-1,16
L4	100	-0,19	0,4	-0,47
L5	200	-0,61	0,8	-0,76
L6	806	-4,89	3,22	-1,52
L7	261	-0,81	1,04	-0,77
L8	844	-4,87	3,38	-1,44
L9	299	-0,58	1,2	-0,48
L10	200	-0,54	0,8	-0,68
L11	200	-1,13	0,8	-1,41
L12	100	-0,57	0,4	-1,43
L13	160	-0,25	0,64	-0,38
L14	381	-0,74	1,52	-0,48
L15	130	-0,13	0,52	-0,25
L16	295	-1,27	1,18	-1,08
L17	781	-3,35	3,12	-1,07
L18	140	-0,42	0,56	-0,75
L19	112	0,04	0,45	0,08
L20	594,1	-2,1	2,38	-0,88
L21	277,7	-0,1	1,11	-0,09
L22	422,4	-1,36	1,69	-0,80
L23	200	-0,58	0,8	-0,72

Fonte: Empresa A (2023)

Destacadas em vermelho, estão as lajes que não atenderam aos critérios de deslocamento limite, definidos pela ABNT NBR 6118:2023, que estabelece um valor de $L/250$ para que o deslocamento não seja visível ou desagradável durante sua utilização.

2.7- Análise dinâmica da estrutura

A análise dinâmica do pavimento tipo (Tabela 3) revela que as frequências de vibração da estrutura não atendem aos critérios relacionados ao conforto dos usuários. Quanto mais baixa a frequência, maior a sensação de desconforto para as pessoas.

Tabela 3 – Resultados da análise dinâmica do pavimento tipo

Modo de Vibração	Frequência (Hz)	Limite (Hz)	Taxa
1	3,531	4,8	136%
2	3,961	4,8	121%
3	4,525	4,8	106%
4	5,861	4,8	82%
5	6,818	4,8	70%

Fonte: Empresa A (2023)

Observa-se que o valor de 4,8 Hz adotado como limite para a frequência de vibração do pavimento tipo está abaixo do amplamente adotado como uma prática recomendada. Esse valor pode ser justificado por particularidades específicas do projeto ou pela aplicação de normas internacionais que tratam da análise de vibração de lajes. No entanto, para edifícios residenciais convencionais, o intervalo recomendado pelas normas brasileiras e pelas normas internacionais mais amplamente utilizadas costuma estar entre 8 e 10 Hz. (Murray, 2016) Um valor que não foi atingido em nenhum dos modos de vibração. Segundo a ABNT NBR 6118:2023, para assegurar o comportamento satisfatório das estruturas sujeitas a vibrações, deve-se afastar ao máximo possível a frequência natural da estrutura (f_n) da frequência crítica (f_{crit}), que depende da destinação da respectiva edificação. Para atender a essa exigência, a relação entre a frequência natural e a crítica deve obedecer à condição $f_n > 1,2 f_{crit}$.

Mesmo sem a aplicação de todas as cargas previstas, as lajes e vigas já exibiam sinais de fissuração, deslocamentos consideráveis e danos severos em elementos como as alvenarias. Tais manifestações patológicas são evidências de falhas de projeto, execução ou material utilizado. Cabe ressaltar que esses danos não serão completamente cessados ao longo do tempo, uma vez que a deformação do concreto ocorre de forma gradual durante toda a vida útil da edificação, o que implica em uma tendência contínua de aumento nas deformações.

Portanto, as falhas apresentadas não apenas afetam a integridade estrutural e a segurança da edificação, mas também comprometem sua funcionalidade em termos de uso, tornando

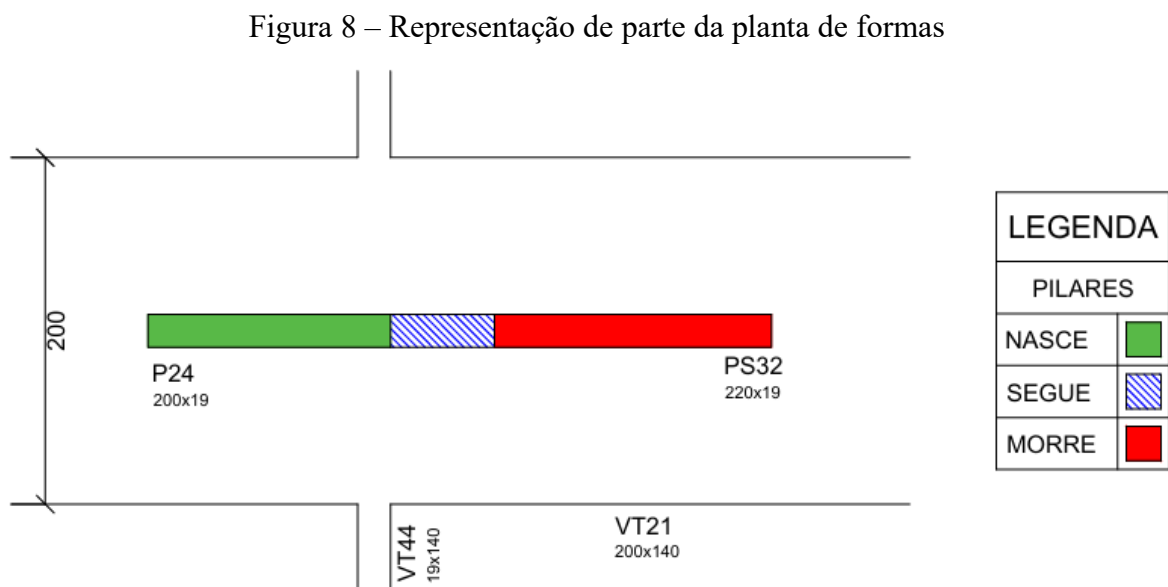
essencial a adoção de medidas corretivas adequadas para garantir a durabilidade e a segurança a longo prazo.

2.8- Análise do detalhamento do projeto

Além das falhas de cálculo previamente discutidas, diversos outros erros no detalhamento das armaduras foram identificadas, erros que podem comprometer significativamente a segurança da estrutura.

Um dos erros observados no projeto estrutural foi a adoção de pilares com largura muito inferior à das vigas de transição. Esse tipo de erro resulta em uma condição de apoio prejudicada para a viga, o que compromete seu comportamento estrutural. Em vez de atuar como um elemento linear, a viga passa a se comportar como um maciço, o que induz tensões de tração transversais. Tais tensões não são contempladas adequadamente no projeto, uma vez que a armadura normalmente prevista não é dimensionada para esse tipo de solicitação, gerando um risco significativo de fissuração e comprometimento da segurança estrutural.

A situação é ilustrada na Figura 8 fornecida pela empresa construtora, onde, no primeiro subsolo, é possível observar o pilar PS32, que recebe a viga de transição VT21, além do pilar P24, também apoiado nessa estrutura.



Fonte: Arquivo Construtora (2021)

2.9- Reforço estrutural

No início de 2023 foram iniciados os serviços de reforço, seguindo as recomendações técnicas necessárias. Uma das principais diretrizes foi a paralisação total das atividades, até que uma meta específica de pilares e vigas reforçados fosse alcançada.

Essa paralisação teve duração aproximada de três meses, durante os quais cerca de 80% pilares e vigas localizados no subsolo passaram pelo processo de reforço. Após essa etapa inicial, o restante da estrutura foi sendo submetida a reforços progressivos ao longo do ano, com todos os trabalhos finalizados até o final de 2023.

2.10- Recomendações técnicas

Foram estabelecidas uma série de especificações detalhadas para a execução do reforço estrutural, abrangendo materiais, técnicas de aplicação e cuidados necessários. Quanto aos materiais, foi especificado o uso de aço CA-50 para concreto armado, microconcreto autoadensável usinado com resistência de 50 MPa e relação água/cimento de 0,45. Também foram indicados produtos como Argamassa Tixotrópica que não escorre e pode ser aplicada em superfícies com qualquer inclinação e resina epóxi para ancoragem das armaduras (Figura 9).

Figura 9 – Produtos utilizados no reforço

a) Argamassa Tixotrópica



b) Resina Epóxi



Fonte: Quartzolit (2024)

Além dos materiais, foram fornecidos roteiros de execução para o reforço estrutural. O primeiro passo envolvia o escareamento do concreto, removendo-o até se alcançar um substrato firme e rugoso, com boas condições de aderência (Figura 10). Em alguns casos, observou-se que partes de pilares estavam mais frágeis e quebradiças, com alta concentração de areia ou

brita, características da segregação do concreto, que ocorre quando este não é adequadamente vibrado durante a execução. Nessas situações, a parte frágil do pilar foi totalmente removida, com o devido escoramento.

Figura 10 – Pilares em processo de reforço

a) Pilar da rampa escarificado e marcado para ser perfurado



b) Pilar do poço do elevador escarificado



Fonte: Autor (2023)

Em seguida, foram realizados os furos e aberturas necessárias. O processo de limpeza dos furos foi feito com jatos de ar filtrado e escova de cerdas de aço. Após a limpeza, os furos foram preenchidos com adesivo epóxi bicomponente, aplicado por meio de uma pistola que mistura os componentes no bico. A pistola possui um prolongador para injetar a resina desde o fundo do furo. Depois disso, as barras de aço a serem ancoradas foram inseridas nos furos.

A etapa seguinte foi a montagem das armaduras (Figura 11), garantindo o cobrimento nominal de 3 cm. A montagem das formas deve ser feita de forma a garantir que sejam firmes e estanques (Figura 11); em alguns casos, foram utilizados dispositivos de alimentação tipo cachimbo. O substrato foi então saturado até ficar completamente molhado, mas sem acúmulo de água na base da forma.

Figura 11 – Pilares em processo de reforço

a) Pilar com armadura montada



b) Pilar com forma finalizada



c) Viga de transição escarificada e com armadura parcialmente montada



Fonte: Autor (2023)

Posteriormente, o preenchimento foi feito com microconcreto fluido. A desforma ocorreu 24 horas após a concretagem no caso dos pilares, e foi realizada uma cura úmida, com aspersão de água limpa a cada 2 horas, durante um período de 7 dias.

2.11- Análise comparativa de resistência dos pilares

Para avaliar o desempenho estrutural dos pilares antes e depois do reforço, foram realizados cálculos da força resistente de alguns pilares, de acordo com os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2023. O objetivo foi determinar o aumento ou ganho de resistência proporcionado pelo reforço aplicado, considerando o comportamento combinado do concreto e da armadura adicionados ao elemento estrutural original.

A Tabela 4 apresenta os valores específicos da área de concreto, área de aço e força resistente dos pilares em dois cenários: antes e após o reforço. No que se refere ao reforço, os valores indicados para área de concreto e de aço representam exclusivamente as seções adicionais integradas ao pilar original durante o processo de recuperação e melhoria estrutural. A coluna denominada "Força resistente do pilar total", ilustra o resultado da soma da força resistente do pilar original com a resistência adicional fornecida pelo reforço.

Com base nos cálculos realizados, observou-se que o processo de reforço estrutural trouxe um ganho médio de 62% na resistência dos pilares do edifício.

Tabela 4 – Comparação de força resistente dos pilares antes e depois do reforço

Pilar	Pilar original			Reforço			Força resistente do pilar total (kN)	Taxa de ganho de resistência com reforço
	Área de Concreto (cm ²)	Área de Aço (cm ²)	Força resistente do Pilar (kN)	Área de Concreto (cm ²)	Área de Aço (cm ²)	Força resistente do Pilar (kN)		
P1	1900	30	4765,1	2000	25	7158,4	11923,4	60%
P2	4800	85	12438,5	4200	37,5	14380,4	26818,9	54%
P3	6000	120	16146,0	6600	52,5	22318,3	38464,3	58%
P4	6000	125	16363,4	5000	45	17135,1	33498,4	51%
P7	5000	100	13455,0	7650	57,5	25723,2	39178,2	66%
P9	2500	45	6510,1	1400	11,25	4739,1	11249,2	42%
P10	2750	40	6748,1	5825	35	19204,8	25952,8	74%
P11	1900	30	4765,1	3102	30	10721,1	15486,2	69%
P12	3800	80	10399,7	5302	42,5	17943,2	28342,9	63%
P13	2850	45	7147,6	3780	45	13431,5	20579,1	65%
P17	1900	24	4504,2	2390	23,75	8288,0	12792,2	65%
P18	1600	35	4436,0	1400	16,25	4956,5	9392,5	53%
P20	2100	64	6607,6	3680	42,5	13019,3	19626,9	66%

P26	4351	35,2	9455,5	3945	22,5	12954,2	22409,6	58%
P34	4770	50	10862,1	4180	42,5	14537,1	25399,2	57%
PS21	4180	100	11961,4	4920	26,25	16077,0	28038,4	57%
PS32	4180	40	9352,7	11160	60	36487,3	45840,0	80%
PS46	4560	115	13305,7	13140	60	42498,0	55803,7	76%
PS56	3420	60	8838,0	6170	42,5	20578,2	29416,2	70%

Fonte: Autor (2024)

CONCLUSÃO

A análise do edifício em questão revela a importância crucial de uma abordagem rigorosa tanto no projeto quanto na execução de estruturas de concreto armado, especialmente em construções de grande porte. As patologias identificadas, como fissuras em lajes, vigas e alvenarias, demonstraram que falhas de dimensionamento, omissões em relação a cargas atuantes e a ausência de consideração de ações horizontais, como o vento, podem comprometer seriamente a estabilidade estrutural.

A ocorrência de fissurações e deformações excessivas, além de frequências de vibração inadequadas, são evidências claras de deficiências no projeto inicial. O estudo também reforça a importância de avaliações técnicas independentes, como as realizadas pela empresa de consultoria, que identificaram com precisão os problemas estruturais e recomendaram soluções de reforço específicas para pilares, vigas de transição e fundações.

A adoção de técnicas de reforço adequadas, como a inserção de armaduras adicionais e o uso de microconcreto fluido, foi essencial para restabelecer a segurança e a funcionalidade da edificação. Além disso, o uso de ferramentas avançadas de modelagem estrutural permitiu uma análise detalhada dos esforços e comportamentos dos elementos estruturais, proporcionando maior precisão nas intervenções corretivas.

Este caso destaca a necessidade de um controle rigoroso de qualidade nas fases de projeto e execução, assim como a importância de correções imediatas e eficazes quando se identificam problemas estruturais. A adoção de práticas corretivas e de reforço não apenas restaura a integridade do edifício, mas também garante sua durabilidade e segurança a longo prazo, preservando o investimento e a confiança dos ocupantes na construção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2023. Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123:2023. Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

AECWEB. **A importância da Avaliação Técnica de Projeto**. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/revista/materias/a-importancia-da-avaliacao-tecnica-de-projeto/23366>>. Autor: Redação AECweb/e-Construmarket, Maio-Junho, 2022. Acesso em: 15 set. 2024.

ARALDI, E. **Reforço de pilares por encamisamento de concreto armado: Eficiência de métodos de cálculo da capacidade resistente comparativamente a resultados experimentais**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra Carbono**. 2003. 317f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CARDOSO, F. M. N. **Contribuição ao estudo de patologias e reforço estrutural em estruturas de concreto armado: estudo de caso em um condomínio residencial em São Luís-MA**. Trabalho de conclusão de curso: São Luís, 2018.

COLOMBARI, R. S. **Análise de métodos de reforço estrutural em viga de concreto armado para recuperação estrutural – Estudo de caso em Caratinga-MG**. Trabalho de conclusão de curso: Caratinga, 2019.

G1 Grande Minas. ODA, Michelly. **Prédio que foi evacuado e permanece interditado em Montes Claros tem a estrutura escorada**. 09 abril 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/grande-minas/noticia/2024/04/09/predio-de-16-andares-que-foi-evacuado-e-permanece-interditado-em-montes-claros-tem-a-estrutura-escorada.ghtml>. Acesso em: 18 abril 2024.

MURRAY T. M. **Steel design guide series n° 11: Vibrations of steel-framed structural systems due to human activity**, 2 ed. American Institute of Steel Construction (AISC), USA, 2016.

PEREIRA, B. M. G. **Modelos Analíticos para a previsão do Desempenho de Pilares Confinados com Fibras de Carbono**. 2012. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão Instituto Politécnico de Bragança, Bragança Paulista, 2012.

QUARTZOLIT. **Soluções técnicas quartzolit para reparos, proteção e reforço**. Disponível em: <<https://www.quartzolit.weber/solucoes-tecnicas-quartzolit-para-reparos-protacao-e-reforco/reparos-em-vigas-e-pilares/reparo-estrutural-quartzolit>>. Acesso em: 10 set. 2024.

QUARTZOLIT. **Adesivos e Selantes quartzolit**. Disponível em: <<https://www.quartzolit.weber/adesivos-e-selantes-quartzolit/adesivos-especiais/tecbond-tix-quartzolit>>. Acesso em: 10 set. 2024.

REIS, A. P. A. **Reforço de Vigas de Concreto Armado por meio de Barras de Aço Adicionais ou Chapas de Aço e Argamassa de Alto Desempenho**. 1998. 239f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

REIS, L. S. N. **Sobre a Recuperação e Reforço das Estruturas de Concreto Armado**. 2001. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

SILVA, A. S. da. **Estrutura de concreto armado e sua aplicabilidade, patologias e erros na execução e na concretagem de pilares e vigas: Uma revisão de literatura**. 23 nov. 2021. Monografia (graduação) do Curso de Bacharel em Engenharia Civil – Faculdade UNIRB.

SOUZA, V. C., RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1 ed. São Paulo: Ed. Pini, 1998. 255 p.

ZUCCHI, F. L. **Técnicas para reforço de elementos estruturais**. 50p. Monografia em Engenharia Civil: Santa Maria, 2015.