

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

**REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS VERTICAIS EM
UMA EDIFICAÇÃO FRENTE À POSSIBILIDADE DE
COLAPSO PROGRESSIVO**

LAURA JORDANA OLIVEIRA SOUSA

JATAÍ
2021

LAURA JORDANA OLIVEIRA SOUSA

**REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS VERTICAIS EM
UMA EDIFICAÇÃO FRENTE À POSSIBILIDADE DE
COLAPSO PROGRESSIVO**

Trabalho apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Maria Emerenciano Bueno.

JATAÍ
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

Sousa, Laura Jordana Oliveira.

Redistribuição de esforços verticais em uma edificação frente à possibilidade de colapso progressivo/ Laura Jordana Oliveira Sousa. -- Jataí: IFG, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, 2021.

79 f.; il.

Orientadora: Prof^a. Dra. Mônica Maria Emerenciano Bueno.
Bibliografias.

1. Colapso progressivo. 2. Falha estrutural. 3. Redistribuição de esforços. I. Bueno, Mônica Maria Emerenciano. II. IFG, Câmpus Jataí. III. Título.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico/Tecnológico - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Laura Jordana Oliveira Sousa

Matrícula: 20141020260213

Título do Trabalho: Redistribuição de esforços verticais em uma edificação frente à possibilidade de colapso progressivo.

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Jataí, 02/03/2021.

Laura Jordana O. Sousa

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ

Folha de Aprovação

Laura Jordana Oliveira Sousa

Redistribuição de esforços verticais em uma edificação frente à possibilidade de colapso progressivo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Monografia defendida e aprovada, em 04 de fevereiro de 2021, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Mônica Maria Emerenciano Bueno

Presidente da banca / Orientadora

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof Dr. Eulher Chaves Carvalho

Membro

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Marcos Honorato de Oliveira

Membro

Universidade de Brasília

Jataí – GO

2021

Documento assinado eletronicamente por:

- **Laura Jordana Oliveira Sousa, LAURA JORDANA OLIVEIRA SOUSA - ESTUDANTE - IFG - CÂMPUS JATAÍ (10870883000306)**, em 22/02/2021 09:25:55.
- **Marcos Honorato de Oliveira, MARCOS HONORATO DE OLIVEIRA - 234310 - PROFESSOR DE ENGENHARIA - UNB (00038174000143)**, em 16/02/2021 16:43:33.
- **Eulher Chaves Carvalho, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 15/02/2021 18:24:49.
- **Monica Maria Emerenciano Bueno, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 15/02/2021 17:58:27.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 01/02/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 127419

Código de Autenticação: f202db870b



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Rua Maria Vieira Cunha, nº 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714
(64) 3605-0837 (ramal: 837)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela sua presença constante na minha vida, me dando forças nos momentos em que precisei, sei que sem Ele nada disso seria possível.

À minha orientadora, a Professora Doutora Mônica Maria Emerenciano Bueno, por ter se disposto a ser minha orientadora nesse trabalho, agradeço a paciência, apoio e orientação para a realização desse trabalho, obrigada por todo conhecimento compartilhado.

À empresa TQS Informática, pelo suporte técnico prestado para o esclarecimento de dúvidas e pela disponibilização da licença do TQS Unipro Educacional para a realização desse trabalho.

Aos meus pais, Laura e João Lázaro, por desde sempre serem meus grandes incentivadores, sempre fizeram o melhor que podiam por mim, me dando todo o amor, suporte e apoio para que eu pudesse estar aqui hoje. Nada disso seria possível sem vocês. Serei eternamente grata por tudo que fazem por mim, amo muito vocês.

Ao meu namorado Bruno Lisboa, que está comigo desde o início dessa caminhada acadêmica, agradeço o amor, compreensão, incentivo e por sempre ter acreditado no meu potencial. Te amo.

Aos amigos que estiveram comigo na faculdade, mas principalmente a Jacquelyne, Isabella, Lohrane, e Carol, que estiveram comigo nesses anos de estudo, passando juntas pelos momentos difíceis, agradeço a amizade e companheirismo. Nunca me esquecerei de vocês.

E por fim, aos demais professores do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, por todos os ensinamentos e experiências compartilhadas.

RESUMO

SOUSA, L. J. O. (2021). **Redistribuição de esforços verticais em uma edificação frente à possibilidade de colapso progressivo**. 79p. Trabalho de conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Jataí, 2021.

O colapso progressivo é um fenômeno de falha estrutural, que já causou o colapso total ou parcial de vários edifícios no mundo. Desde a década de 50 esse é um tema estudado em outros países, que já possuem medidas de prevenção ao colapso progressivo descritas em suas normas regulamentadoras. No Brasil, esse tema começou a ser debatido recentemente, havendo uma ausência de informações normativas adequadas e estudos mais aprofundados sobre o tema. Nesse trabalho foi realizado um breve estudo sobre o colapso progressivo, apresentando sua definição, tipo, principais causas, casos ocorridos em edifícios e medidas de prevenção. Um edifício fictício foi modelado no software TQS de acordo com a norma brasileira NBR 6118 (2014), foram realizadas modificações na estrutura, como a remoção de pilares, com o objetivo de analisar o comportamento da estrutura diante da perda de elementos de apoio.

Palavras-chave: Colapso progressivo, falha estrutural, redistribuição de esforços.

ABSTRACT

SOUSA, L. J. O. (2021). **Redistribution of vertical forces in a building in view of the possibility of progressive collapse**. 79p. Final course work Bachelor of Civil Engineering, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Jataí, 2021.

Progressive collapse is a phenomenon of structural failure, which has already caused the total or partial collapse of several buildings in the world. Since the 1950s, this has been a topic studied in other countries, which already have measures for the prevention of progressive collapse described in their regulatory standards. In Brazil, this topic started to be debated recently, with an absence of adequate normative information and more in-depth studies on the topic. In this work, a brief study was carried out on the progressive collapse, presenting its definition, type, main causes, cases occurred in buildings and preventive measures. A fictitious building was modeled in the TQS software according to the Brazilian standard NBR 6118 (2014), modifications were made to the structure, such as the removal of pillars, to analyze the behavior of the structure in the face of the loss of support elements.

Keywords: Progressive collapse, structural failure, redistribution of forces.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Edifício Ronan Point em Londres	13
Figura 2 – Edifício Liberdade, escombros após desabamento	14
Figura 3 – Representação do colapso progressivo	16
Figura 4 – Caracterização do colapso progressivo	17
Figura 5 – Tipos de colapso progressivo.....	17
Figura 6 – Etapas do colapso tipo zíper	18
Figura 7 – Etapas do colapso tipo panqueca	19
Figura 8 – Etapas do colapso tipo dominó	20
Figura 9 – Etapas do colapso tipo instabilidade	21
Figura 10 – Skyline Plaza Apartaments	23
Figura 11 – Edifício Ronan Point.....	24
Figura 12 – Edifício Alfred P. Murrah	25
Figura 13 – Escombros do desabamento do edifício liberdade e prédios vizinhos	26
Figura 14 – Real Class antes e após o colapso	27
Figura 15 – Destroços após o desabamento de edifício comercial em São Mateus.....	29
Figura 16 – Pista de pouso do Aeroporto de Funchal, Ilha da Madeira	30
Figura 17 – Regiões de apoio	31
Figura 18 – Pilar comum e pilar cintado.....	32
Figura 19 – Apresentação da interface do software CAD/TQS	33
Figura 20 – Corte esquemático do edifício.....	34
Figura 21 – Visualização 3D da estrutura do edifício	35
Figura 22 – Planta de forma do pavimento tipo.....	36
Figura 23 – Pilares que foram removidos dos exemplos.....	40
Figura 24 – Esforços normais atuantes nos pilares do exemplo 1	41
Figura 25 – Visualização 3D do edifício de 4 pavimentos com remoção do P13.....	42
Figura 26 – Mapa dos carregamentos de esforços normais nos pilares do Exemplo 2	43
Figura 27 – Visualização 3D do edifício de 4 pavimentos com remoção do P15.....	45
Figura 28 – Mapa dos carregamentos de esforços normais nos pilares do Exemplo 3	46
Figura 29 – Visualização 3D do edifício de 4 pavimentos com remoção do P25.....	48
Figura 30 – Mapa dos carregamentos de esforços normais nos pilares do Exemplo 4	49

Figura 31 – Visualização 3D do edifício de 10 pavimentos em situação original	51
Figura 32 – Corte esquemático do edifício com 10 pavimentos	52
Figura 33 – Esforços normais atuantes nos pilares do Exemplo 5	53
Figura 34 – Visualização 3D do edifício de 10 pavimentos com remoção do P13.....	54
Figura 35 – Mapa dos carregamentos de esforços normais nos pilares do Exemplo 6	55
Figura 36 – Visualização 3D do edifício de 4 pavimentos com remoção do P15.....	57
Figura 37 – Mapa dos carregamentos de esforços normais nos pilares do Exemplo 7	58
Figura 38 – Visualização 3D do edifício de 4 pavimentos com remoção do P25.....	60
Figura 39 – Mapa dos carregamentos de esforços normais nos pilares do Exemplo 8	61
Figura 40 – Visualização 3D do edifício de 15 pavimentos em situação original	63
Figura 41 – Corte esquemático do edifício com 15 pavimentos	64
Figura 42 – Esforços normais atuantes nos pilares do Exemplo 9	65
Figura 43 – Visualização 3D do edifício de 15 pavimentos com remoção do P13.....	66
Figura 44 – Mapa dos carregamentos esforços normais nos pilares do Exemplo 10 ...	67
Figura 45 – Visualização 3D do edifício de 15 pavimentos com remoção do P15.....	69
Figura 46 – Mapa dos carregamentos esforços normais nos pilares do Exemplo 11 ...	70
Figura 47 – Visualização 3D do edifício de 15 pavimentos com remoção do P25.....	72
Figura 48 – Mapa dos carregamentos esforços normais nos pilares do Exemplo 12 ...	73
Figura 49 – Comparação dos acréscimos de carga em cada exemplo	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados e parâmetros utilizados no cálculo da carga do vento na estrutura .	37
Tabela 2 – Lista de combinações geradas pelo TQS	38
Tabela 3 – Resumo de exemplos estudados	39
Tabela 4 – Comparação de resultados dos exemplos 1 e 2.....	44
Tabela 5 – Comparação de resultados dos exemplos 1 e 3.....	47
Tabela 6 – Comparação de resultados dos exemplos 1 e 4.....	50
Tabela 7 – Comparação de resultados dos exemplos 5 e 6.....	56
Tabela 8 – Comparação de resultados dos exemplos 5 e 7	59
Tabela 9 – Comparação de resultados dos exemplos 5 e 8.....	62
Tabela 10 – Comparação de resultados dos exemplos 9 e 10.....	68
Tabela 11 – Comparação de resultados dos exemplos 9 e 11	71
Tabela 12 – Comparação de resultados dos exemplos 9 e 12.....	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	RESUMO DOS CAPÍTULOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	COLAPSO PROGRESSIVO	16
2.2	TIPOS DE COLAPSO PROGRESSIVO	17
2.2.1	Colapso tipo zíper	18
2.2.2	Colapso tipo panela	19
2.2.3	Colapso tipo dominó	20
2.2.4	Colapso tipo instabilidade	21
2.2.5	Colapso tipo seção	22
2.3	PRINCIPAIS CAUSAS DO COLAPSO PROGRESSIVO	22
2.4	CASOS DE DESABAMENTO TOTAL OU PARCIAL DE EDIFÍCIOS POR COLAPSO PROGRESSIVO	24
2.4.1	Edifício Ronan Point	24
2.4.2	Edifício Alfred P. Murrah	25
2.4.3	Edifício Liberdade	26
2.4.4	Edifício Real Class	27
2.4.5	Edifício Comercial em São Paulo	28
2.5	MEDIDAS DE PREVENÇÃO DO COLAPSO PROGRESSIVO	29
2.5.1	Redundância	30
2.5.2	Continuidade	31
2.5.3	Ductilidade	32
3	MODELAGEM ESTRUTURAL	33
3.1	APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE CAD/TQS	33
3.2	APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA ADOTADA PARA ANÁLISE	34
3.2.1	Geometria	34

3.2.2 Materiais.....	36
3.2.3 Carregamentos Verticais	36
3.2.4 Carregamento Horizontal.....	37
3.3 COMBINAÇÕES DE AÇÕES	38
4 EXEMPLOS DE ESTUDO	39
4.1 EXEMPLO 1: EDIFÍCIO DE 4 PAVIMENTOS SITUAÇÃO ORIGINAL	41
4.1.1 Análise dos esforços normais solicitantes nos pilares.....	41
4.2 EXEMPLO 2: EDIFÍCIO DE 4 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO P13	42
4.2.1 Análise da redistribuição de esforços normais nos pilares	43
4.3 EXEMPLO 3: EDIFÍCIO DE 4 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO P15	45
4.3.1 Análise da redistribuição de esforços normais nos pilares	45
4.4 EXEMPLO 4: EDIFÍCIO DE 4 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO P25	48
4.4.1 Análise da redistribuição de esforços normais nos pilares	48
4.5 EXEMPLO 5: EDIFÍCIO DE 10 PAVIMENTOS SITUAÇÃO ORIGINAL	51
4.5.1 Análise dos esforços normais solicitantes nos pilares.....	53
4.6 EXEMPLO 6: EDIFÍCIO DE 10 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO P13	54
4.6.1 Análise da redistribuição de esforços normais nos pilares	55
4.7 EXEMPLO 7: EDIFÍCIO DE 10 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO P15	57
4.7.1 Análise da redistribuição de esforços normais nos pilares	58
4.8 EXEMPLO 8: EDIFÍCIO DE 10 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO P25	60
4.8.1 Análise da redistribuição de esforços normais nos pilares	61
4.9 EXEMPLO 9: EDIFÍCIO DE 15 PAVIMENTOS SITUAÇÃO ORIGINAL	63
4.9.1 Análise dos esforços normais solicitantes nos pilares.....	65
4.10 EXEMPLO 10: EDIFÍCIO DE 15 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO P13	66
4.10.1 Análise da redistribuição de esforços normais nos pilares	67
4.11 EXEMPLO 11: EDIFÍCIO DE 15 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO P15	69
4.11.1 Análise da redistribuição de esforços normais nos pilares	70
4.12 EXEMPLO 12: EDIFÍCIO DE 15 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO P25	72
4.12.1 Análise da redistribuição de esforços normais nos pilares	73
4.13 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
REFERÊNCIAS	78

1 – INTRODUÇÃO

O colapso progressivo é um fenômeno de ruína estrutural caracterizado pela propagação de uma falha inicial que pode ser causada por erros de projeto e construção, ações variáveis não previstas em projeto ou ações excepcionais como explosões, colisões de veículos e situações ambientais extremas. A falha local inicial de um elemento estrutural se propaga a outros elementos estruturais, que sobrecarregados podem levar ao colapso de toda a estrutura ou de grande parte dela.

O colapso do edifício Ronan Point (Figura 1), em Londres, que ocorreu no ano de 1968 despertou a atenção mundial para esse fenômeno. A estrutura do edifício de 22 andares composta por paredes e lajes pré-moldadas, teve a parede do 18º destruída por uma explosão de gás, a ausência dessa parede que sustentava a laje do andar de cima levou ao desabamento das lajes e paredes do andar superior, o colapso se propagou até o último pavimento e posteriormente até o térreo. Esse incidente deu início a estudos sobre o tema no meio internacional e foram introduzidas medidas preventivas do colapso progressivo em normas regulamentadoras de diversos países do mundo.

Figura 1 – Edifício Ronan Point em Londres, 1968. Destruição causada pela explosão.



Fonte: Wikipédia (2019).

1.1 – JUSTIFICATIVA

No Brasil, um dos casos de fenômeno de colapso progressivo em edifícios, ocorreu no Edifício Liberdade (Figura 2), no Rio de Janeiro em 2012, que desabou após a remoção de um pilar no 9º pavimento durante uma reforma, o desabamento ainda causou a queda de dois edifícios vizinhos, causando um total de 22 mortes.

Figura 2 – Edifício Liberdade, escombros após desabamento.



Fonte: Istoé (2012).

Se comparado aos estudos realizados em países estrangeiros, esse tema ainda é pouco estudado no Brasil, segundo Laranjeiras (2011, p.1) “as nossas normas referem-se ao fenômeno colapso progressivo dos edifícios de forma sumária, enigmática e instigante.” De fato, a NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto) cita o colapso progressivo de forma breve, o item 10.3 da norma aponta que a segurança das estruturas de concreto sempre deve ser verificada em relação ao estado limite último de colapso progressivo, sem mencionar como realizar essa verificação e o item 19.5.4 recomenda armações nas lajes lisas sobre os pilares para *“garantir a ductilidade local e a consequente proteção contra o colapso progressivo”*. Já a NBR 9062:2017 (Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado) no item 5.1.1.4 recomenda que *“devem ser tomados cuidados especiais na organização geral da estrutura e nos detalhes construtivos, de forma a minimizar a possibilidade de colapso progressivo”*, mas não informa quais são os cuidados especiais a que se refere. Devido a essa ausência de informações normativas e estudos mais aprofundados sobre o assunto no meio nacional, torna-se de grande relevância o estudo sobre esse fenômeno, visto que sua ocorrência pode causar onerosos danos físicos e financeiros e a perda de várias vidas humanas.

1.2 – OBJETIVOS

Os objetivos desse trabalho são apresentados a seguir por meio de objetivo geral e objetivos específicos.

1.2.1 – OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é analisar o comportamento estrutural de edifícios fictícios de concreto armado, quanto à redistribuição de esforços verticais diante da possibilidade de colapso progressivo através da remoção de pilares.

1.2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Esse estudo possui três objetivos específicos, o primeiro é realizar um breve estudo do tema colapso progressivo, apresentando sua definição, tipos, principais causas, casos ocorridos em edifícios e medidas de prevenção. O segundo é analisar a redistribuição de esforços verticais nos pilares de edifícios fictícios de concreto armado, modelados com auxílio do software TQS, diante da possibilidade de colapso progressivo com a remoção de elementos de apoio. E o terceiro é analisar edifícios com número de pavimentos diferentes, para avaliar se esse parâmetro irá influenciar nos resultados.

1.3 – RESUMO DOS CAPÍTULOS

No capítulo 1 são apresentadas a introdução, justificativa e objetivos gerais e específicos do trabalho.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre o assunto com todas as informações necessárias para compreensão do tema abordado no trabalho.

No capítulo 3 inicia-se o estudo, com a modelagem estrutural e apresentação da estrutura adotada para análise e do software utilizado no estudo.

No capítulo 4 são apresentados os exemplos de estudo e resultados obtidos em cada um dos casos.

No capítulo 5 é realizada a conclusão do trabalho.

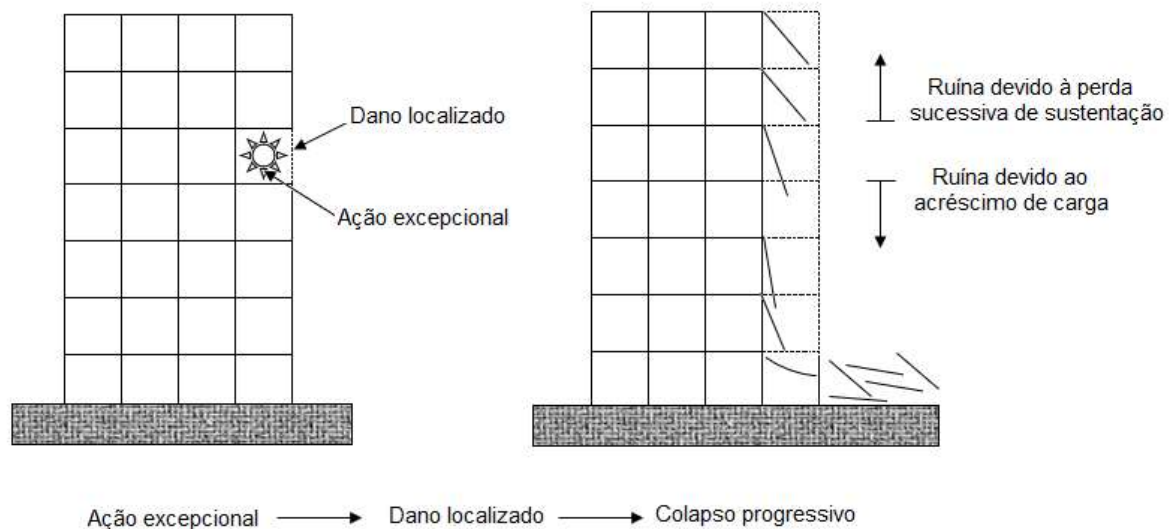
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – COLAPSO PROGRESSIVO

O termo colapso progressivo é utilizado na engenharia estrutural para descrever o fenômeno de falha estrutural similar a uma reação em cadeia na qual um evento inicial localizado conduz ao colapso total ou parcial de uma edificação. A característica básica do colapso progressivo é que o estado final de falha é desproporcionalmente maior que o evento inicial do colapso (LARANJEIRAS, 2011).

A ruptura de um elemento estrutural geralmente leva ao colapso dos elementos adjacentes a ele associados, que por sua vez, levam ao colapso outros membros e assim por diante. Na Figura 3, está ilustrada a ocorrência desse fenômeno em um edifício, em que um dano localizado, causado por uma ação excepcional leva ao colapso dos elementos vizinhos, que não são capazes de resistir às cargas e esforços a eles transferidos, fazendo com que toda a estrutura ou parte dela, entre em colapso.

Figura 3 – Representação do colapso progressivo

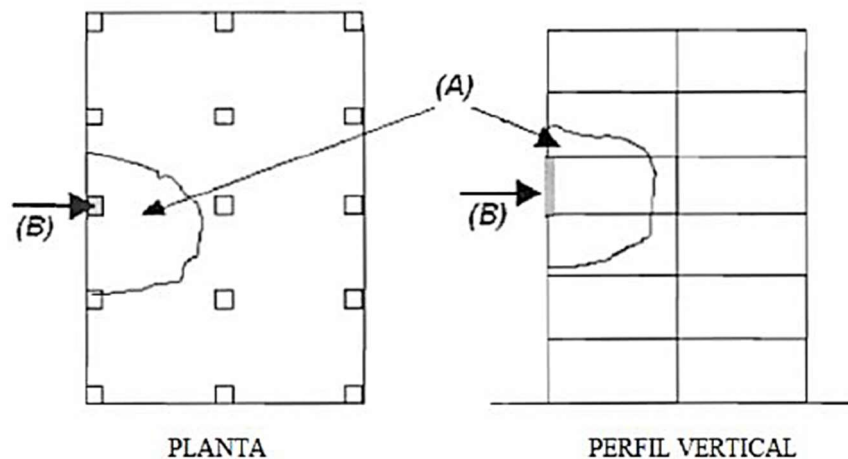


Fonte: Autora (2020).

De acordo com a NISTIR 7396:2007 (National Institute of Standards and Technology) norma dos Estados Unidos que apresenta as melhores práticas para reduzir o potencial de colapso progressivo em edifícios, considera-se como colapso progressivo, casos em que ações excepcionais causam danos que se propagam horizontalmente em mais de 15% da área de piso ou 100m², utilizando o menor valor entre estes, e na propagação vertical atinge mais de dois andares. Na Figura 4 são

representadas as duas situações. Na planta do pavimento observa-se a propagação horizontal dos danos e no perfil vertical observa-se a propagação dos danos entre os pavimentos.

Figura 4 – Caracterização do colapso progressivo. (A) Extensão do dano após propagação; (B) Ponto do colapso inicial

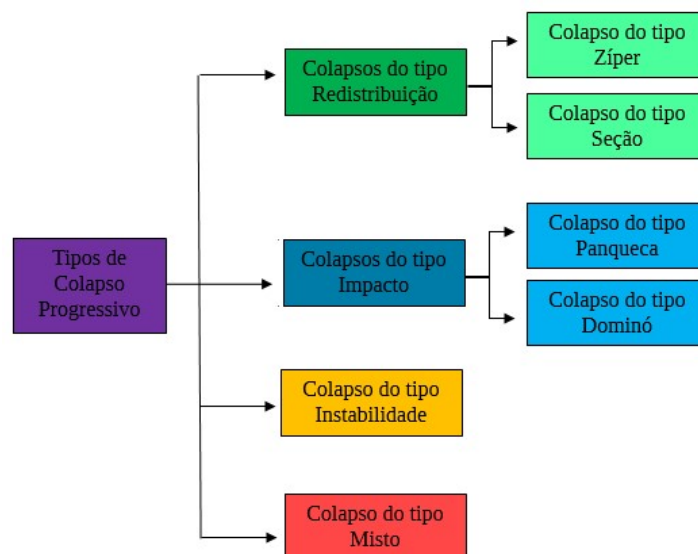


Fonte: Eurocode 1 (2006).

2.2– TIPOS DE COLAPSO PROGRESSIVO

STAROSSEK (2007) fornece uma classificação do colapso progressivo, baseada na resposta da estrutura após a falha inicial, essa classificação é apresentada na Figura 5 e pode ser aplicada a todos os tipos de estruturas.

Figura 5 – Tipos de colapso progressivo



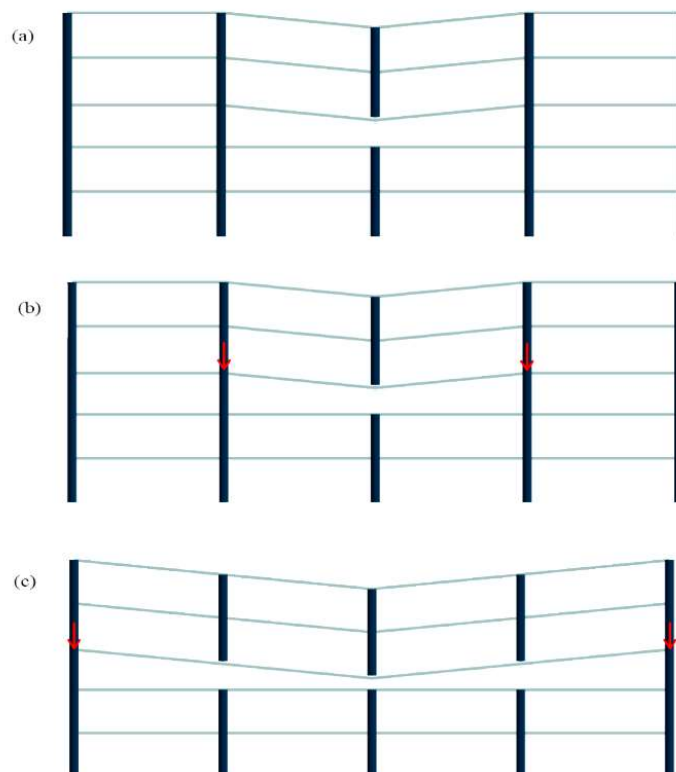
Fonte: Autora (2020).

Os colapsos do tipo zíper e seção pertencem à classe redistribuição e são caracterizados por se desenvolverem pela redistribuição de forças transferidas pelos membros estruturais em falha. Os colapsos do tipo panqueca e do tipo dominó pertencem ao tipo impacto, que são caracterizados por se desenvolverem a partir da ação de forças de impacto. No colapso do tipo instabilidade, o colapso é gerado pela perda de estabilidade de elementos comprimidos. E os colapsos do tipo misto incluem características de mais de um tipo de colapso. A seguir são apresentados os colapsos tipo zíper, tipo panqueca, tipo dominó, tipo instabilidade e tipo seção.

2.2.1 – COLAPSO TIPO ZÍPER

Nesse mecanismo ocorre uma falha local em um ou mais elementos estruturais, a redistribuição das forças transferidas por esses elementos, gera uma sobrecarga nos elementos adjacentes, levando-os à ruptura. O colapso avança na direção transversal (ortogonal em um modelo simplificado perfeito) às forças principais nos elementos em falha.

Figura 6 – Etapas do colapso tipo zíper: a) Falha inicial de um pilar; b) Aumento de carga nos pilares próximos; c) Sobrecarga nos pilares adjacentes resultando em um colapso progressivo.

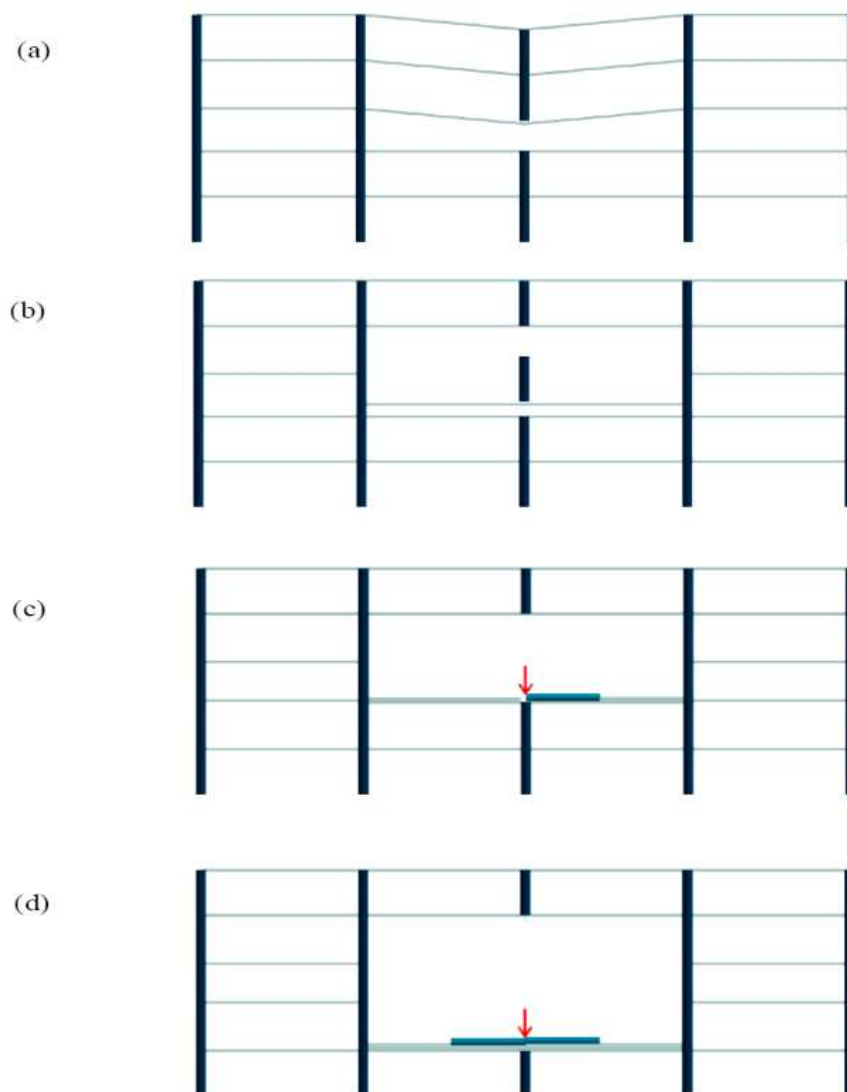


Fonte: Kozlova (2013).

2.2.2 – COLAPSO TIPO PANQUECA

O colapso tipo panqueca é muito comum em edifícios, principalmente em prédios altos. Esse fenômeno geralmente se inicia com a perda da capacidade total ou parcial de um elemento estrutural vertical, o que faz com que um elemento superior da estrutura desmorone fazendo com que os elementos localizados abaixo também venham a ruir pela sobrecarga, criando uma reação em cadeia. Nesse tipo de colapso a propagação da falha é essencialmente vertical. O colapso do edifício World Trade Center, em Nova York é um bom exemplo desse fenômeno.

Figura 7 – Etapas do colapso tipo panqueca: a) Falha inicial de uma coluna; b) Transformação de energia potencial em energia cinética; c) Sobrecarga dos elementos localizados abaixo da falha inicial; d) Progressão do colapso.

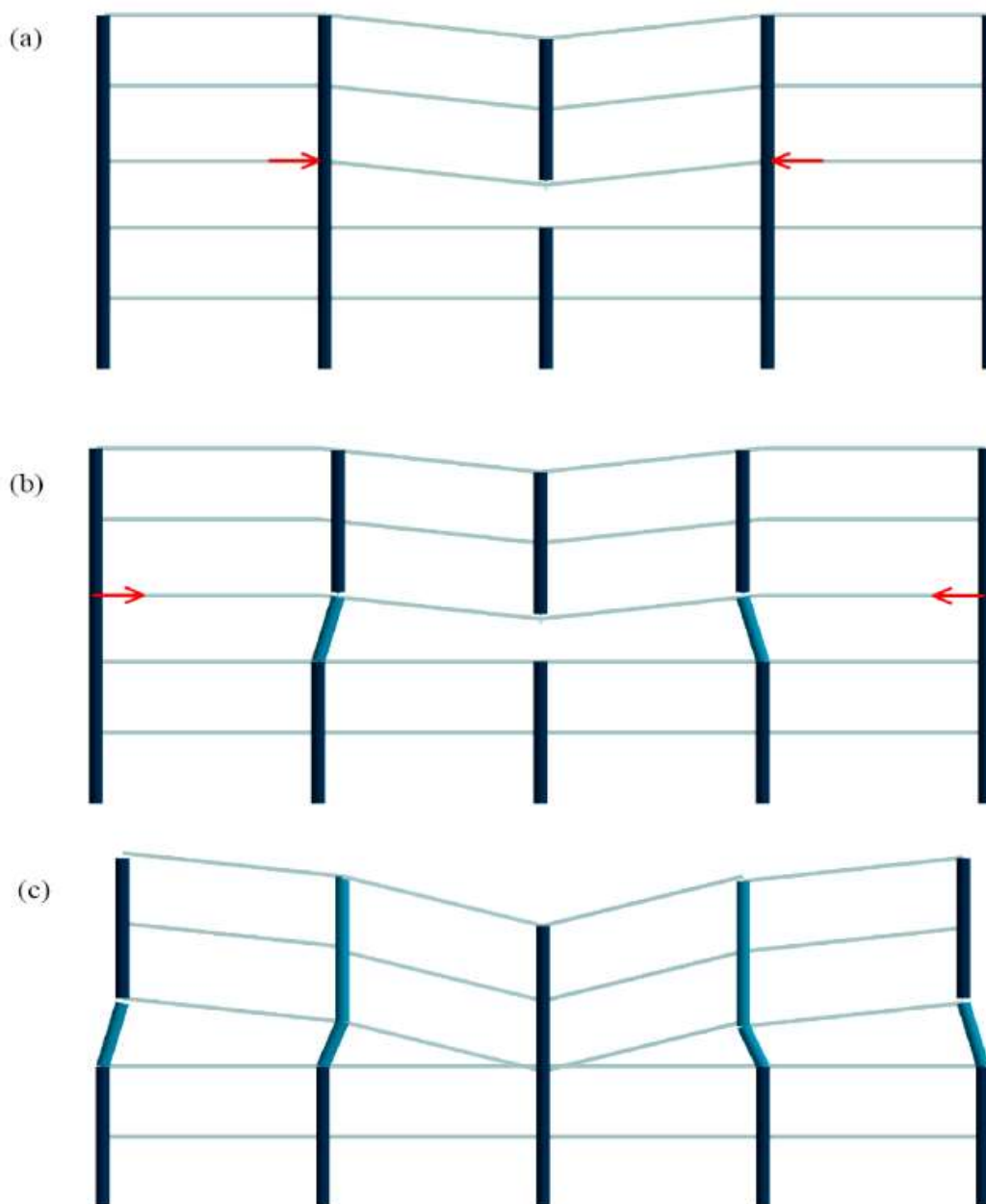


Fonte: Kozlova (2013).

2.2.3 – COLAPSO TIPO DOMINÓ

Nesse tipo de colapso, há a progressão dos danos através de impactos (como o observado em peças de dominó). Nesse tipo de colapso, a propagação ocorre essencialmente na direção horizontal, a queda de um elemento provoca a queda do elemento seguinte e assim por diante, é mais comum em estruturas como torres de transmissão de energia e pontes.

Figura 8 – Etapas do colapso tipo dominó: a) Falha inicial e redistribuição da carga para os pilares adjacentes; b) Tombamento dos pilares adjacentes; c) Progressão do colapso devido ao tombamento.

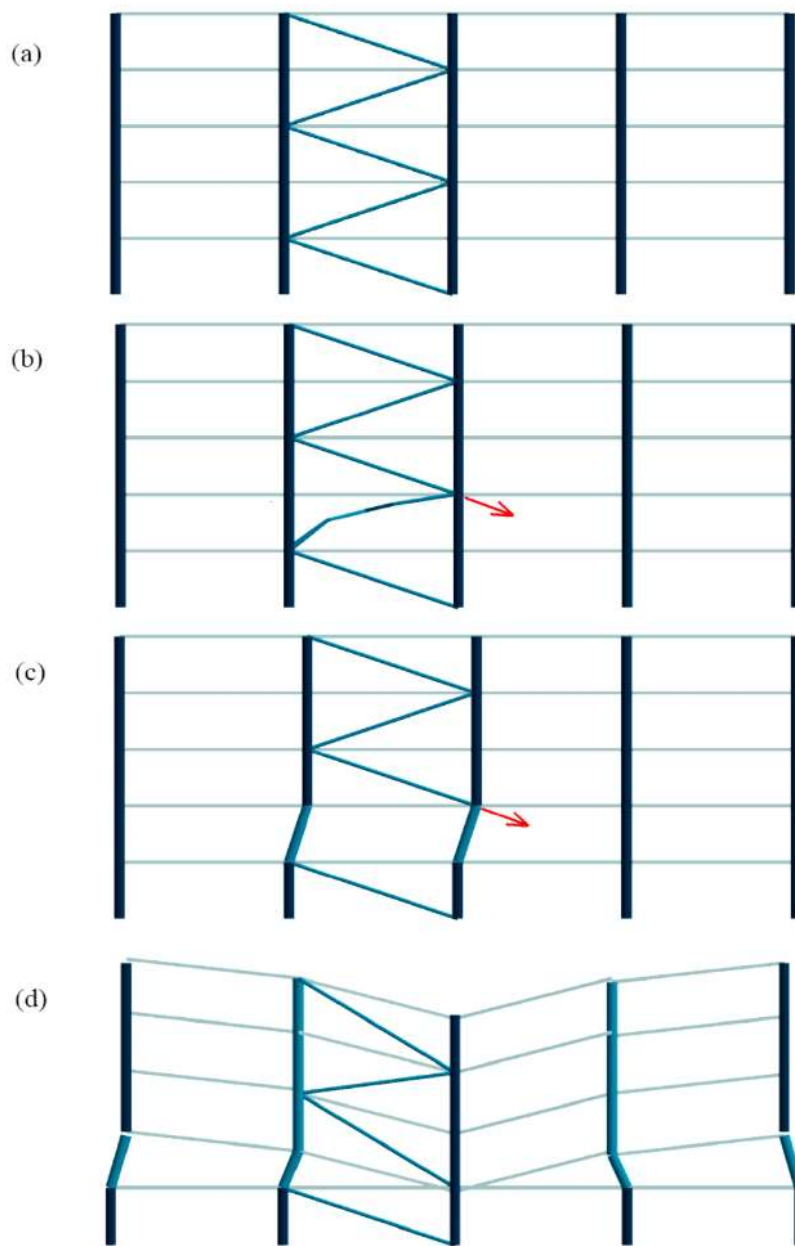


Fonte: Kozlova (2013).

2.2.4 – COLAPSO TIPO INSTABILIDADE

A instabilidade de uma estrutura é causada por pequenas irregularidades, como imperfeições ou carregamento transversal, que geram grandes deformações ou o colapso. A falha de algum elemento de contraventamento ou de fixação pode tornar o sistema instável e resultar em colapso. O colapso ocorre quando a instabilidade do elemento instável se propaga aos elementos estáveis.

Figura 9 – Etapas do colapso tipo instabilidade: a) Estrutura original com treliça de contraventamento; b) Falha inicial na treliça de contraventamento; c) Perda de estabilidade devido a falha; d) Progressão do colapso provocado pela instabilidade.



Fonte: Kozlova (2013).

2.2.5 – COLAPSO TIPO SEÇÃO

Quando um elemento sob momento de flexão ou tensão axial tem parte de sua seção transversal cortada, as forças transmitidas por essa parte são redistribuídas na seção transversal remanescente. O aumento de tensão pode causar a ruptura de toda a seção transversal, ou parte dela. Esse tipo de colapso é semelhante ao do tipo zíper, porém nesse caso é mais apropriado utilizar os termos “parte da seção transversal” e “seção transversal remanescente” ao invés de “elemento” e “estrutura remanescente” (STRATOSSEK, 2007).

Difícilmente o colapso de uma edificação pode ser classificado em um único tipo, sendo mais comum os colapsos do tipo misto, que incluem características de mais de um tipo de colapso.

2.3 – PRINCIPAIS CAUSAS DO COLAPSO PROGRESSIVO

Segundo PEREIRA (2015), as três principais causas do colapso progressivo são os erros de projeto ou de construção, ações variáveis abusivas e ações excepcionais.

Os erros de projeto ou construção são responsáveis pela maioria dos casos de colapso em edifícios, estes erros podem acontecer mesmo com profissionais qualificados e com o uso de normas e processos de construção adequados. Tais erros se devem a falibilidade humana e podem ser minimizados por um melhor controle, supervisão e gestão de qualidade nas construções.

As ações variáveis abusivas, causam esforços que ultrapassam esforços considerados em projeto, e mesmo com as majorações e coeficientes de segurança essa sobrecarga pode levar a falha de elementos estruturais.

As ações excepcionais referem-se a eventos com baixa possibilidade de ocorrência, tais como explosões de gás e bombas, colisões de veículos e aviões e situações ambientais extremas como terremotos e furacões.

Mas além do colapso progressivo de edifícios em uso, há também diversos casos de colapso de edifícios em construção. O colapso de edifícios em construção pode ser causado pela resistência insatisfatória do concreto, sobrecargas de construção e técnicas inadequadas de construção. Segundo LARANJEIRAS (2011), os edifícios em construção têm maior probabilidade de colapso do que os mesmos

edifícios em fase de uso, e as falhas que levam ao colapso durante a construção não têm início pelas mesmas situações que causam falhas no edifício em uso.

A Figura 10 mostra o edifício residencial Skyline Plaza após sofrer colapso progressivo durante a construção do 24º pavimento em 1973, em Virgínia. O colapso estendeu-se verticalmente por toda altura do edifício e horizontalmente por todo o anexo de garagem ainda em construção, a falha inicial se deu pela ruptura por punção da laje lisa no 23º pavimento, causada pela remoção precoce do escoramento, no acidente 34 trabalhadores ficaram feridos e 14 morreram.

Figura 10 - Skyline Plaza Apartments, Virgínia, 1973. A estrutura composta por lajes lisas de concreto armado sofreu colapso progressivo durante a construção do 24º pavimento.



Fonte: Laranjeiras (2011).

2.4 – CASOS DE DESABAMENTO TOTAL OU PARCIAL DE EDIFÍCIOS POR COLAPSO PROGRESSIVO

2.4.1 – EDIFÍCIO RONAN POINT

O caso do colapso do Edifício Ronan Point (Figura 11), foi o primeiro a despertar a atenção para o fenômeno do colapso progressivo, o evento ocorreu em Londres, em 1968, um vazamento de gás causou a explosão que destruiu uma das paredes do 18º pavimento, a ausência dessa parede que sustentava a laje do andar superior levou ao desabamento das lajes e paredes de todos os andares superiores e posteriormente o desabamento dos andares inferiores pelo impacto do peso sobre eles. O edifício residencial Ronan Point tinha 22 andares e 64 metros de altura, sua estrutura era composta por paredes e lajes pré-moldadas, cada laje era sustentada pelas paredes do andar inferior. As paredes e lajes eram conectadas por parafusos e as juntas preenchidas com argamassa. Esse sistema, apesar de fácil e rápida execução não possibilitava a redistribuição de cargas no caso de ruptura de uma das paredes de sustentação.

Figura 11 – Edifício Ronan Point, Londres, 1968. Destruição causada pela explosão.



Fonte: Slaga (2013).

2.4.2 – EDIFÍCIO ALFRED P. MURRAH

O Edifício Alfred P. Murrah (Figura 12), em Oklahoma, no ano de 1995, sofreu um ataque terrorista, no qual um caminhão-bomba estacionado em frente a sua fachada foi detonado, a explosão causou grande estrago a toda a fachada do edifício, três dos quatro pilares da fachada que serviam de sustentação a uma viga de transição do terceiro pavimento foram totalmente destruídos, isso levou a ruína todos os pisos que se apoiavam nestes pilares e na viga de transição, estima-se que metade da área do útil do edifício entrou em colapso. As análises do colapso mostraram que apesar de toda a estrutura do edifício ter sido projetada de acordo com as normas da época, a destruição dos pilares do pavimento térreo transmitia cargas e esforços que os pilares vizinhos não eram capazes de suportar, a estrutura não possuía capacidade de redistribuição de cargas com a remoção dos três pilares da fachada atingidos pela explosão da bomba.

Figura 12 – Edifício Alfred P. Murrah, Oklahoma, 1995. Antes e após a explosão.



Fonte: Tehcnul (1995).

2.4.3 – EDIFÍCIO LIBERDADE

Em 2012, o desabamento do edifício Liberdade (Figura 13), no Rio de Janeiro, foi um caso do fenômeno de colapso progressivo ocorrido no Brasil. O edifício composto por um subsolo e 18 andares, teve sua construção finalizada no ano de 1940 e estava em funcionamento há mais de 70 anos. A causa da ruína do edifício foi a demolição de pilares e paredes estruturais no 9º pavimento, durante uma reforma executada pela ocupante do andar, a empresa TO (Tecnologia Organizacional) que havia iniciado a reforma na semana anterior ao desastre.

A empresa TO, já havia realizado uma reforma no 3º pavimento, o andar era um vão livre com pilares externos, nessa reforma foram removidas todas as paredes existentes no pavimento, a reforma foi executada com assessoria profissional e finalizada sem problemas. Posteriormente, a TO iniciou uma reforma no 9º andar sem acompanhamento de um engenheiro, reproduzindo a reforma realizada no 3º andar, sem analisar se havia elementos estruturais que impedissem a demolição de tudo que havia internamente no pavimento, porém os pavimentos não eram iguais. No piso do 9º andar nasciam pilares sobre vigas de transição, que ao serem demolidos deixaram os andares acima do 9º pavimento sem sustentação parcial, o que ocasionou a ruína progressiva da edificação. A queda do edifício ainda causou o desabamento de mais dois edifícios vizinhos, causando um total de 22 mortes.

Figura 13 – Escombros do desabamento do Edifício Liberdade e prédios vizinhos.



Fonte: Folha de S. Paulo (2018).

2.4.4 – EDIFÍCIO REAL CLASS

Outro caso ocorrido no Brasil, o edifício Real Class, que estava em construção em Belém, no Pará, desabou no dia 29 de janeiro 2011, causando a morte de dois operários da obra e uma mulher de uma residência vizinha. O edifício possuía 35 pavimentos e altura total de 104,7 metros. A Figura 14 mostra o edifício Real Class antes e após o desabamento, restando apenas os destroços do prédio.

Figura 14 – Real Class antes e após o colapso.



Fonte: O expresso (2011).

Para a avaliação das causas do acidente, foram realizados laudos e perícias pelo Grupo de Análise de Estruturas e Materiais (GAEMA) da Universidade Federal do Pará e pelo Centro de Perícias Científicas Renato Chaves. De acordo com as avaliações técnicas o desabamento foi causado por diversas causas, algumas são apresentadas a seguir:

- Foi adotado um cobrimento de 15 mm em todos os elementos estruturais, sendo que o mínimo prescrito pela norma para a região do edifício seria de 20 mm para lajes e vigas, e 25 mm para os pilares;
- Os estribos adotados em projeto eram de 4,2 mm sendo que o diâmetro mínimo para armadura transversal indicado pela norma é de 5 mm, e grande parte dos elementos estruturais apresentavam armadura transversal com espaçamento superior ao permitido;
- Alguns pilares apresentavam taxa de armadura longitudinal superiores a 8% da seção bruta do pilar, o que é incompatível com as recomendações normativas;
- Foi observada também, uma grande diferença entre as áreas de aço que foram projetadas e as que foram executadas nos pilares, em alguns casos apresentando até 30% de variação;
- Na concepção estrutural, os pavimentos foram considerados de forma isolada, ao invés de pórticos múltiplos ou um modelo tridimensional;
- O edifício foi subdimensionado em relação a ação do vento, possuindo solicitações muito maiores que as previstas em projeto, foi verificado que um vento de apenas 19m/s poderia levar a ruptura de pilares, sendo que no momento do colapso o vento na região era de cerca de 34,9m/s.

A partir da perícia, foi constatado que o edifício foi projetado em desacordo com as recomendações normativas, resultando em uma estrutura incapaz de resistir as combinações de ações atuantes na região, o que levou a ruína progressiva da edificação, com a falha inicial causada pela ruptura brusca de pilares do edifício.

2.4.5 – EDIFÍCIO COMERCIAL EM SÃO PAULO

Mais um caso ocorrido no Brasil, um prédio comercial que estava sendo construído em São Mateus, zona leste de São Paulo, desabou no dia 27 de agosto de 2013, deixando um total de 10 mortos e 26 feridos. A Figura 15 mostra as ruínas do edifício após o desabamento.

Figura 15 – Destroços após desabamento de edifício comercial em São Mateus.



Fonte: Porto (2013).

Segundo os laudos do instituto de criminalística, a estrutura de concreto armado utilizada não tinha capacidade de suportar o edifício. De acordo com a perícia, o colapso teve início na região central do edifício, e que foi causado por várias irregularidades como: as vigas utilizadas na estrutura eram insuficientes para suportar o peso do prédio; apesar do projeto original apresentar apenas um pavimento, o prédio possuía dois pavimentos; houve erro no gerenciamento da obra, não havendo fiscalização da construção e de materiais utilizados e além disso foi constatado que não houve um estudo geológico para avaliar as condições do terreno.

2.5 – MEDIDAS DE PREVENÇÃO AO COLAPSO PROGRESSIVO

Embora a adoção de medidas de prevenção ao colapso progressivo gere custos adicionais de projeto e construção, e a probabilidade de ocorrência desse evento seja baixa, a consideração do colapso progressivo ao se dimensionar uma estrutura é muito importante, visto que casos de colapso parcial ou total de edifícios causam numerosos prejuízos à vida humana e extensos danos físicos à estrutura. O principal objetivo da utilização de medidas preventivas do colapso progressivo na fase de projeto, é salvar vidas, impedindo o colapso da edificação, pelo menos até que seja evacuada.

De acordo com (LARANJEIRAS, 2011) são três as características que garantem a robustez de uma estrutura e previnem o colapso progressivo: redundância, continuidade e ductilidade. Sendo a robustez, a capacidade que uma estrutura possui de suportar eventos excepcionais como incêndios, explosões, impactos ou erros humanos sem apresentar danos desproporcionais ao dano inicial. A seguir são apresentadas essas três características.

2.5.1 – REDUNDÂNCIA

A redundância caracteriza-se pela existência de caminhos de carga alternativos, possibilitando a redistribuição de esforços em um sistema estrutural com uma falha inicial. Uma estrutura redundante, é aquela que ao ter um apoio danificado, possui outros apoios capazes de suportar a redistribuição de esforços. A Figura 16 mostra um exemplo de estrutura que pode ser considerada redundante, a estrutura da pista de pouso do Aeroporto de Funchal, na Ilha da Madeira, oferece diversas alternativas de redistribuição de esforços no caso de falha de um dos seus apoios, devido a presença de vários pilares de sustentação.

Figura 16 – Pista de Pouso do Aeroporto de Funchal, Ilha da Madeira.



Fonte: Portal Brasil (2010).

2.5.2 – CONTINUIDADE

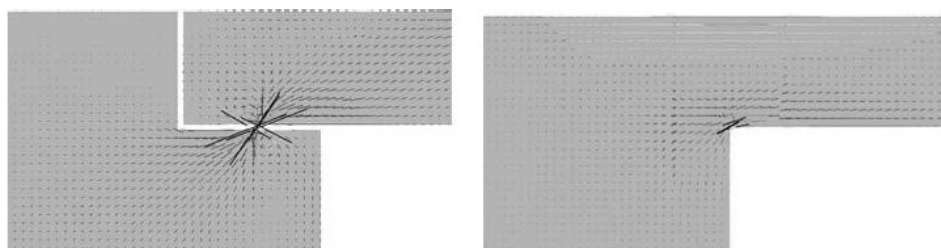
No caso de falha em um elemento estrutural, a redistribuição de esforços a outros elementos irá depender do grau de continuidade do sistema estrutural, ou seja, a conectividade entre os seus elementos: lajes, vigas e pilares.

Uma estrutura redundante, ainda que possua vários apoios, no caso de uma falha localizada, será incapaz de redistribuir os esforços entre seus elementos se não houver continuidade, pois não haverá a interconexão adequada entre elementos que possibilita a transferência de cargas entre eles.

Laranjeiras (2011, p. 24) aponta como problema crítico de estruturas de concreto pré-moldado, o grau de continuidade. Pois a ligação entre pilares, vigas e lajes, muitas das vezes são incompletas, não dispondo de vínculos como uma estrutura monolítica.

Em regiões próximas a juntas e aparelhos de apoio, como pode ser visto na Figura 17 à esquerda, há uma concentração de esforços e tensões, o que prejudica a redistribuição de esforços em casos de colapsos localizados. Enquanto em estruturas monolíticas e sem juntas, não há concentração de esforços e tensões, o que disponibiliza uma maior resistência em casos de colapsos progressivos, conforme ilustra a Figura 17 à direita.

Figura 17 – Regiões de Apoio: Aparelho de apoio; figura à esquerda.
Apoio integral, monolítico; figura à direita.



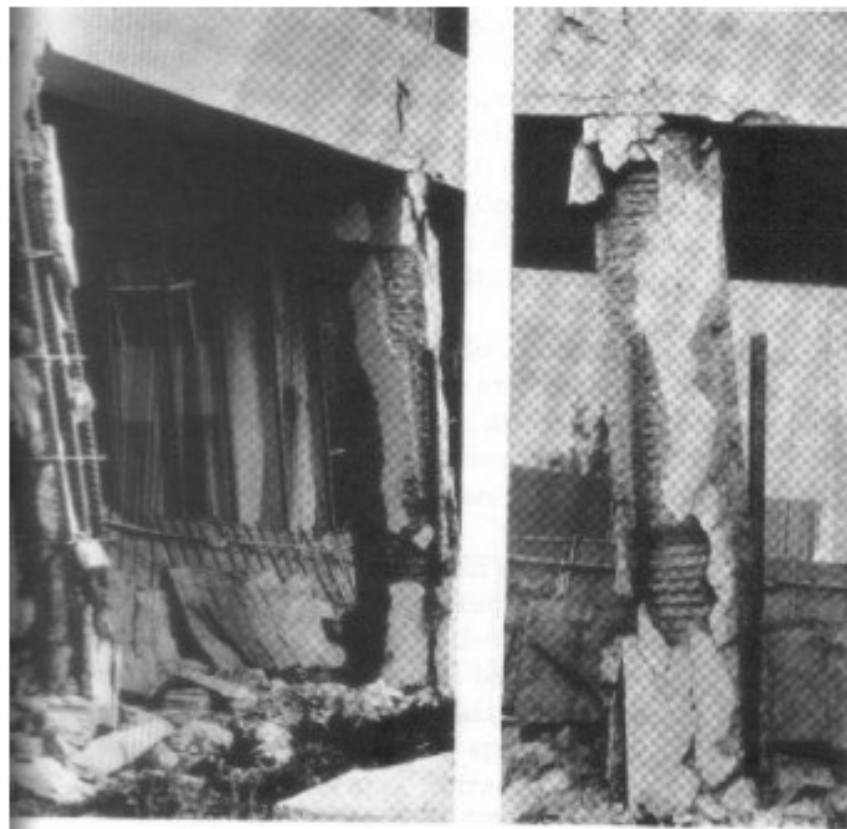
Fonte: Laranjeiras (2011).

2.5.3 – DUCTILIDADE

A ductilidade refere-se a capacidade da estrutura de suportar grandes deformações antes de colapsar, ou seja, a ductilidade relaciona-se com a capacidade de plastificação da estrutura.

Segundo Laranjeiras (2011, p.26) em estruturas de concreto armado, a ductilidade pode ser obtida através do confinamento do concreto, por meio da utilização de pilares cintados. Pilares cintados apresentam um melhor comportamento em relação a prevenção do colapso progressivo, por possuírem capacidade de suportar maiores deformações antes de atingir a ruptura se comparado a pilares comuns não-cintados. A Figura 18 ilustra o desempenho de um pilar cintado e um pilar comum sob ação de um terremoto, à esquerda observa-se um pilar comum severamente destruído, enquanto à direita, observa-se um pilar cintado parcialmente destruído, mas ainda suportando o piso.

Figura 18 – Pilar comum destruído por terremoto; à esquerda. Pilar cintado apresenta deformação causada por terremoto, mas ainda suporta o piso; à direita.



Fonte: Laranjeiras (2011).

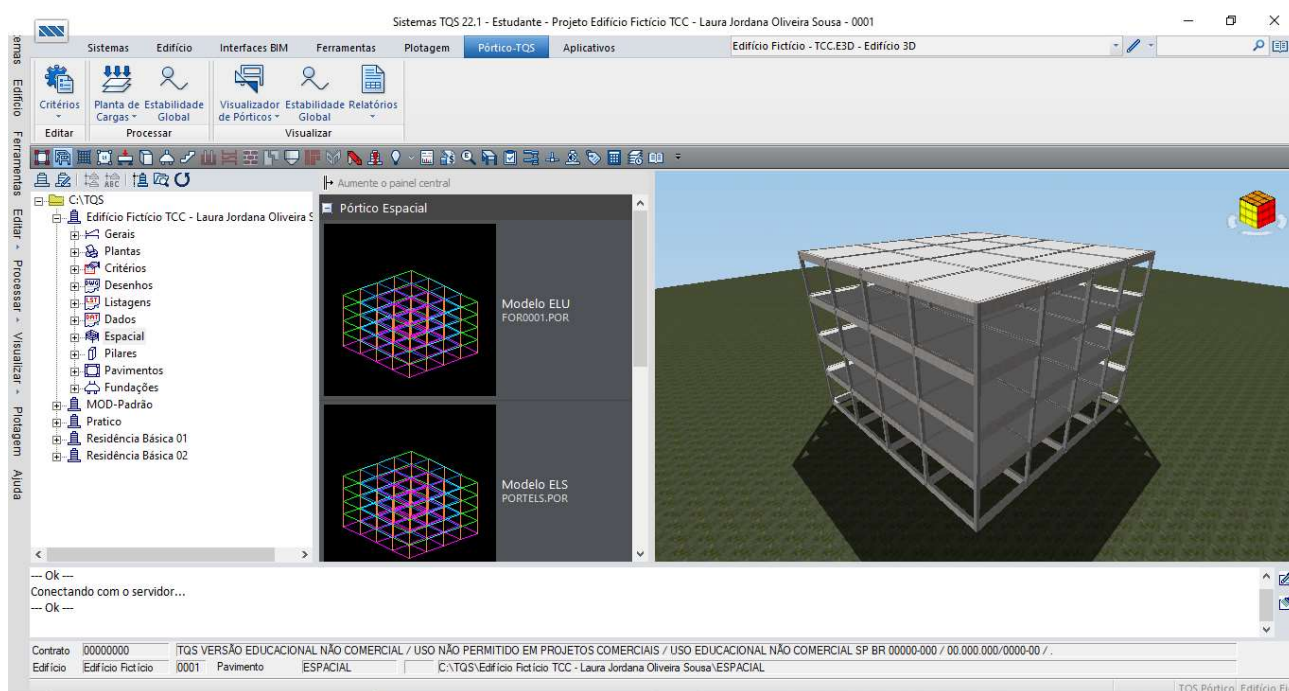
3 – MODELAGEM ESTRUTURAL

O trabalho foi desenvolvido através do estudo de um edifício fictício com estrutura modelada no software CAD/TQS. A partir do edifício original foram realizadas diversas modificações, criando exemplos de estudo com a finalidade de analisar a redistribuição de esforços verticais nos pilares diante de tais modificações na estrutura.

3.1 – APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE CAD/TQS

Para realização do presente trabalho foi utilizado o software CAD/TQS, versão 22.1 com licença Unipro Educacional disponibilizada pela empresa TQS informática Ltda. para o desenvolvimento desse estudo (Figura 19). O TQS oferece todos os recursos necessários para elaboração de um projeto estrutural, de forma integrada e automatizada, com ferramentas para o cálculo, modelagem, análise, dimensionamento e detalhamento de estruturas de concreto armado, protendido e pré-moldado, seguindo todos os critérios da norma NBR 6118 (ABNT, 2014).

Figura 19 – Apresentação da interface do software TQS.



Fonte: Autora (2020).

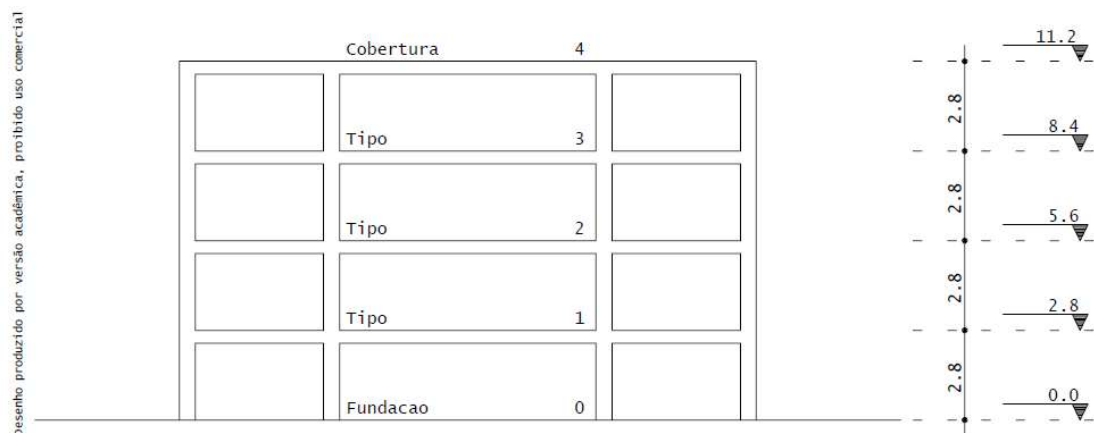
O TQS foi desenvolvido pela empresa TQS Informática Ltda. que lançou a sua primeira versão em 1986. O software é referência em seu campo de atuação e foi escolhido para auxiliar nesse estudo por fornecer ferramentas de modelagem, cálculo e análise estrutural completas, além de apoiar essa pesquisa, com o fornecimento da licença do software que possibilitou o desenvolvimento desse trabalho.

3.2 – APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA ADOTADA PARA ANÁLISE

3.2.1 – GEOMETRIA

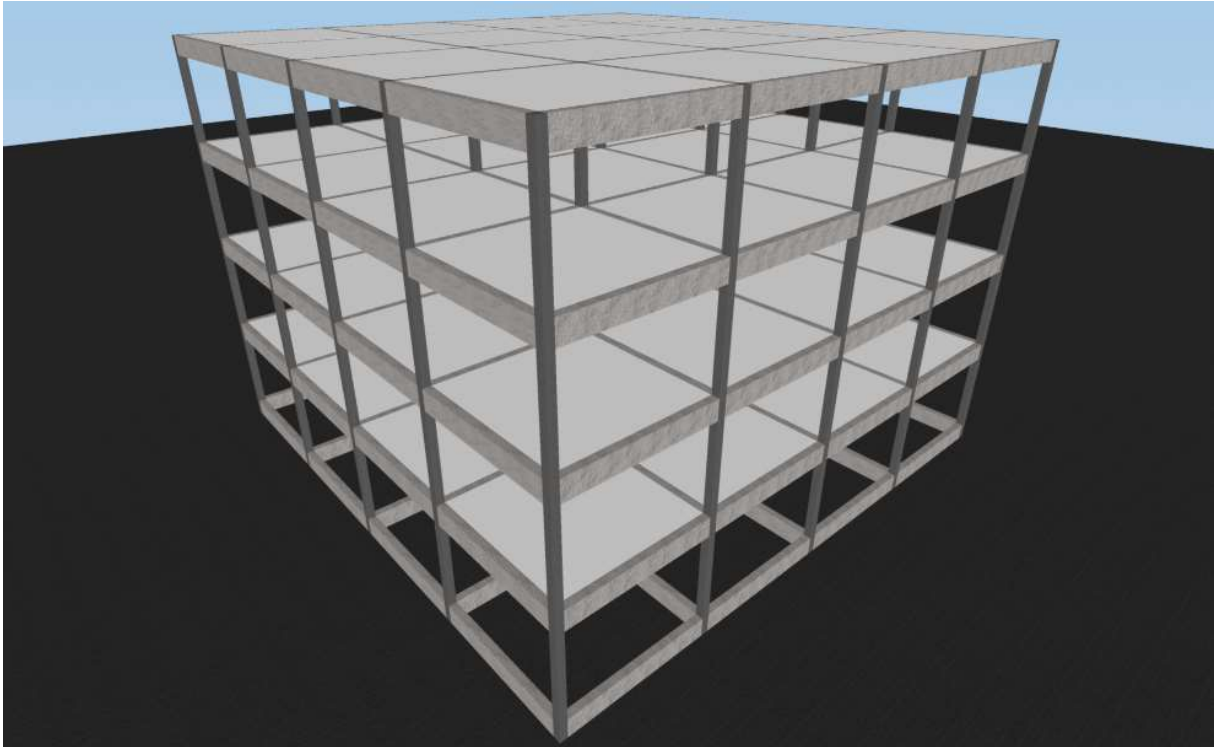
Foi escolhido para o estudo um edifício fictício com estrutura de concreto armado composta por 4 pavimentos iguais (Figura 20). A área dos pavimentos é de 256 m² e o pé direito de 2,80 m. A estrutura do edifício foi modelada com auxílio do software TQS. A Figura 21 mostra a visualização 3D do edifício.

Figura 20 – Corte esquemático do Edifício (sem escala, dimensões em metros).



Fonte: Autora (2020).

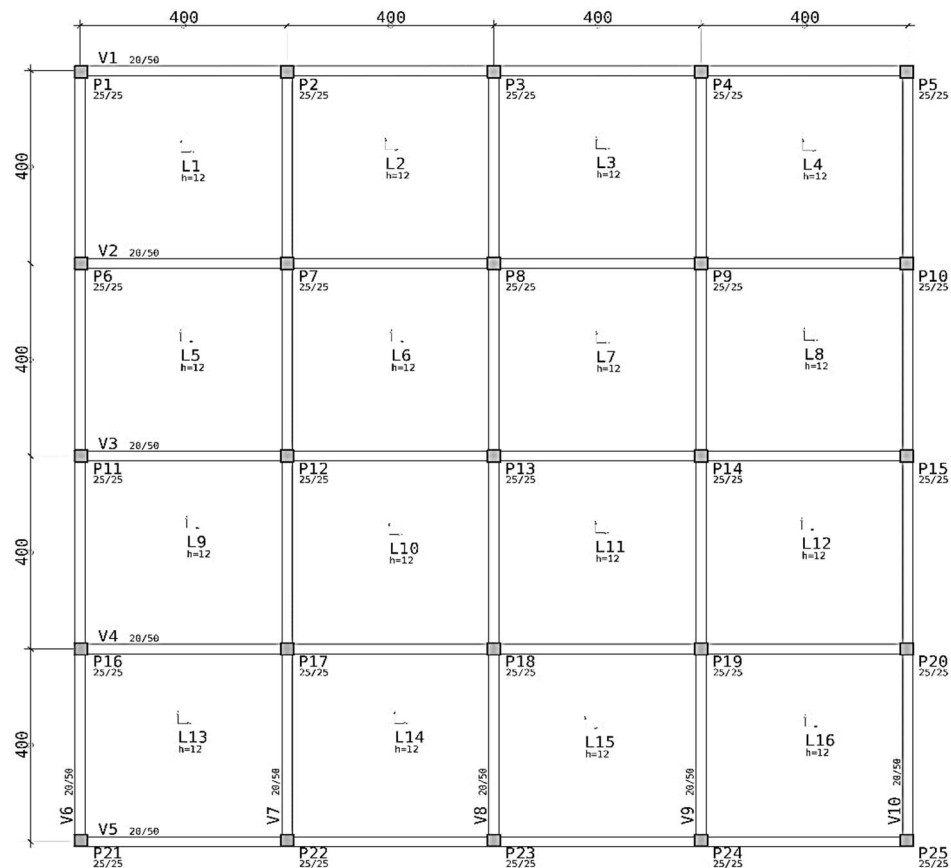
Figura 21 – Visualização 3D da estrutura do edifício.



Fonte: Autora (2020).

A planta de forma do pavimento possui dimensões de 16m x 16m, sendo composta por 25 pilares, a distância entre os pilares é de 4 metros nas duas direções (Figura 22). Os pilares possuem seção de 25cm x 25cm, as vigas 20 cm x 50 cm e as lajes possuem espessura de 12 cm.

Figura 22 – Planta de forma do pavimento tipo (sem escala, dimensões em centímetros).



Fonte: Autora (2020).

3.2.2 – MATERIAIS

Os materiais considerados no dimensionamento da estrutura de concreto armado foram o concreto C25 e o aço CA-50.

3.2.3. – CARREGAMENTOS VERTICAIS

Os carregamentos verticais adotados na estrutura foram:

- Peso próprio dos elementos estruturais de concreto: carga permanente calculada pelo software CAD/TQS considerando peso específico do concreto igual a 25 kN/m^3 de acordo com a NBR 6120 (2019).
- Peso próprio da alvenaria: carga permanente, considerando paredes de 15 cm de espessura, pé direito de 2,80 m e o peso específico do tijolo furado igual a 13 kN/m^3 de acordo com a NBR 6120 (2019).

- Sobrecarga: carga accidental de 2kN/m² em todo pavimento, conforme indicado pela NBR 6120 (2019) para edifícios residenciais.

3.2.4 – CARREGAMENTO HORIZONTAL

No software TQS foi considerada a ação do vento no processamento do edifício, os dados e parâmetros utilizados para o cálculo da carga de vento estão na Tabela 1, a partir do lançamento desses dados o TQS gera automaticamente o carregamento da ação do vento na estrutura.

Tabela 1 – Dados e parâmetros utilizados no cálculo da carga de vento na estrutura.

Descrição	Valor utilizado	Especificação
Velocidade básica do vento	36 m/s	Jataí - GO
Fator do terreno	1.00	Terreno plano
Categoria de rugosidade	III	Terreno plano com obstáculos baixos
Classe da edificação	Classe A	Edifício com maior dimensão horizontal ou vertical < 20 m
S2	$S2 = b \cdot Fr \cdot \frac{z^p}{10}$	Calculado para cada altura z de pavimento
Fator estatístico	1.00	Edificações em geral

Fonte: Autora (2021).

3.3 – COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Com base nos casos de carregamentos e ponderações de ações do edifício, o sistema do TQS gera de forma automática todas as combinações ELU e ELS necessárias para a análise dos pavimentos e análise global do edifício, segue na Tabela 2 a lista de combinações de carregamento geradas para o a estrutura.

Tabela 2 – Lista de combinações geradas pelo TQS.

ESTADO LIMITE	AÇÕES CONSTITUINTES
ELU1	PERMACID/PP+PERM+ACID
ELU1	ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT
ELU1	ACIDCOMB/PP+PERM+0.8ACID+VENT
FOGO	PERMVAR/PP+PERM+0.6ACID
ELS	CFREQ/PP+PERM+0.7ACID
ELS	CFREQ/PP+PERM+0.6ACID+0.3VENT
ELS	CQPERM/PP+PERM+0.6ACID
COMBFLU	COMBFLU/PP+PERM+0.6ACID
ELU1	PERMACID/PP_V+PERM_V+ACID_V
ELU1	ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT
ELU1	ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+0.8ACID_V+VENT
FOGO	PERMVAR/PP_V+PERM_V+0.6ACID_V
ELS	CFREQ/PP_V+PERM_V+0.7ACID_V
ELS	CFREQ/PP_V+PERM_V+0.6ACID_V+0.3VENT
ELS	CQPERM/PP_V+PERM_V+0.6ACID_V
COMBFLU	COMBFLU/COMBFLU/PP_V+PERM_V+0.6ACID_V

Fonte: Autora (2021).

4 – EXEMPLOS DE ESTUDO

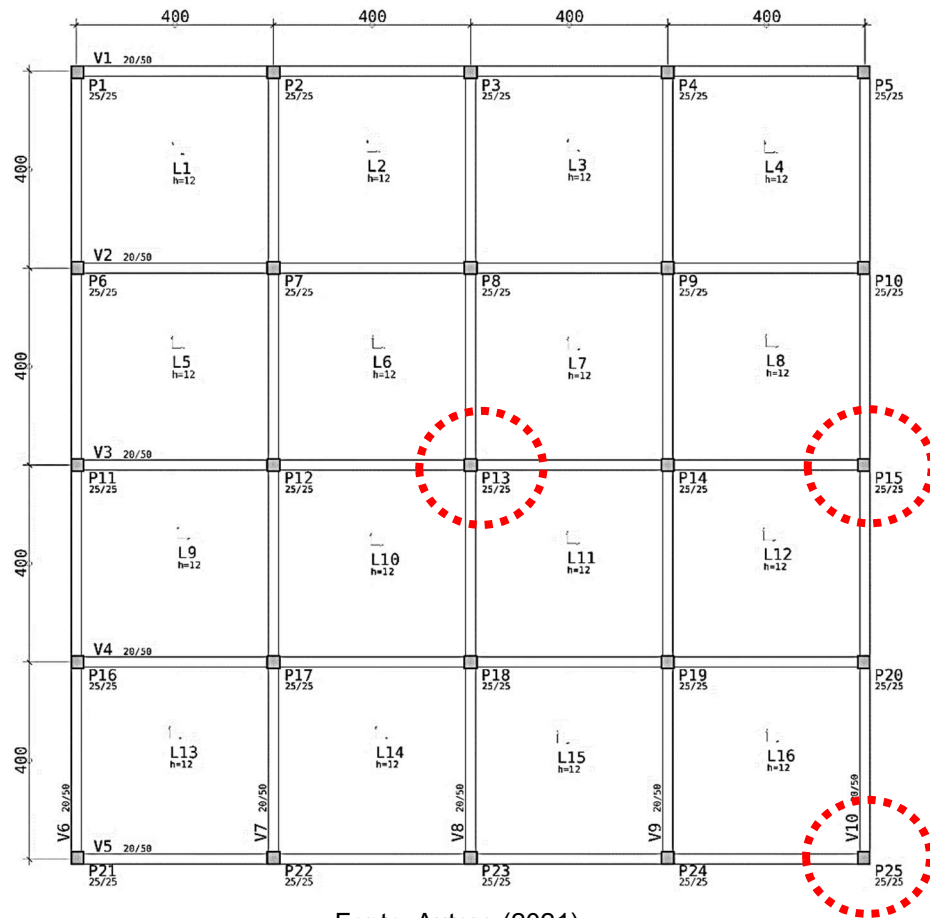
A partir da estrutura do edifício fictício apresentada em 3.2, foram realizadas modificações, gerando um total de 12 exemplos para análise dos efeitos dessas alterações e da capacidade da estrutura de resistir ao colapso progressivo. Para isso, foram realizadas mudanças no número de pavimentos, tendo exemplos com 4, 10 e 15 pavimentos. Em cada um desses, foi feita a remoção dos pilares P13, P15 e P25 no pavimento térreo, um de cada vez em cada exemplo, a Figura 23 mostra os pilares que foram removidos. Um resumo dos exemplos é apresentado a seguir na Tabela 3.

Tabela 3 – Resumo dos exemplos estudados.

Exemplo	Características	
	Nº de Pavimentos	Remoção de pilares
Exemplo 1	4	Estrutura original, sem remoção de pilar
Exemplo 2	4	Remoção do Pilar P13
Exemplo 3	4	Remoção do Pilar P15
Exemplo 4	4	Remoção do Pilar P25
Exemplo 5	10	Estrutura original, sem remoção de pilar
Exemplo 6	10	Remoção do Pilar P13
Exemplo 7	10	Remoção do Pilar P15
Exemplo 8	10	Remoção do Pilar P25
Exemplo 9	15	Estrutura original, sem remoção de pilar
Exemplo 10	15	Remoção do Pilar P13
Exemplo 11	15	Remoção do Pilar P15
Exemplo 12	15	Remoção do Pilar P25

Fonte: Autora (2021).

Figura 23 – Pilares que foram removidos nos exemplos (sem escala, dimensões em centímetros).



Fonte: Autora (2021).

A escolha dos pilares P13, P15 e P25 para serem removidos nos exemplos foi feita por serem, respectivamente, um pilar interno, um pilar de extremidade e um pilar de canto. Para que também fosse avaliado como a posição do pilar removido influencia nas variações e redistribuição de esforços na estrutura.

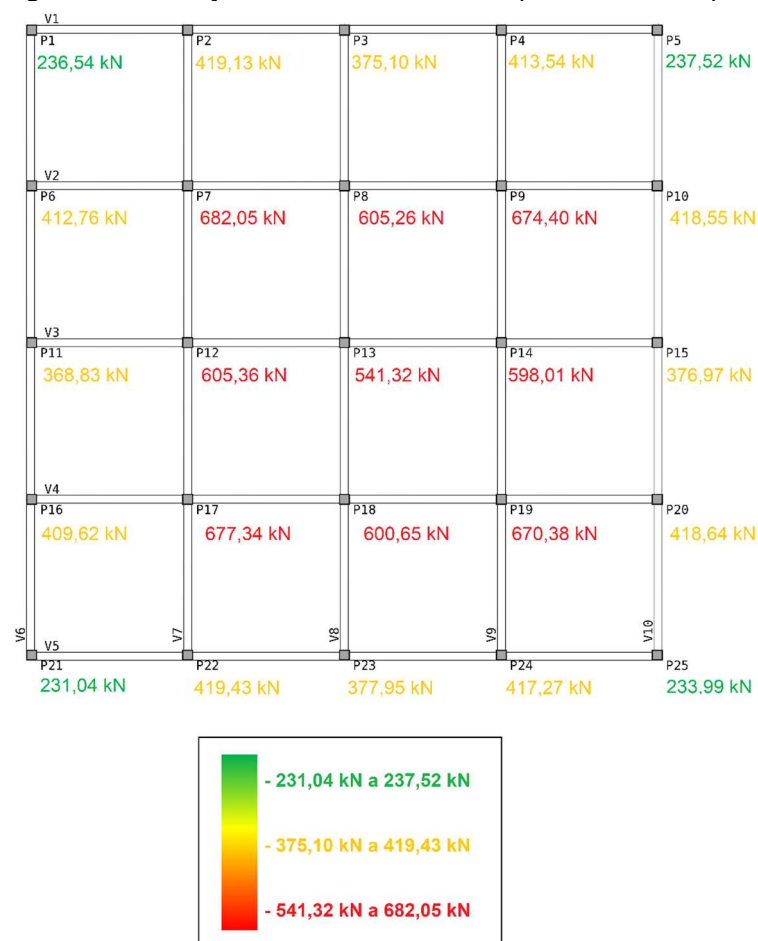
4.1 – EXEMPLO 1: EDIFÍCIO 4 PAVIMENTOS SITUAÇÃO ORIGINAL

No exemplo 1, a estrutura apresentada em 3.2 foi dimensionada e analisada de forma convencional sem nenhuma alteração ou remoção de elemento estrutural. Os resultados obtidos dessa análise são apresentados a seguir.

4.1.1 – ANÁLISE DOS ESFORÇOS NORMAIS SOLICITANTES NOS PILARES

A partir dos dados fornecidos pelo TQS para cada pilar dimensionado nesse exemplo, é apresentado na Figura 24 os maiores valores de esforço normal obtidos entre as diferentes combinações de ações geradas pelo TQS, para cada um dos pilares, no pavimento térreo, dessa forma é possível avaliar de que forma acontece a redistribuição de esforços após a remoção de elementos de apoio nos exemplos seguintes. A cor do carregamento de cada pilar varia conforme a sua magnitude, em que verde representa os menores valores de esforço normal e vermelho representa os maiores valores.

Figura 24 – Esforços normais atuantes nos pilares do Exemplo 1.



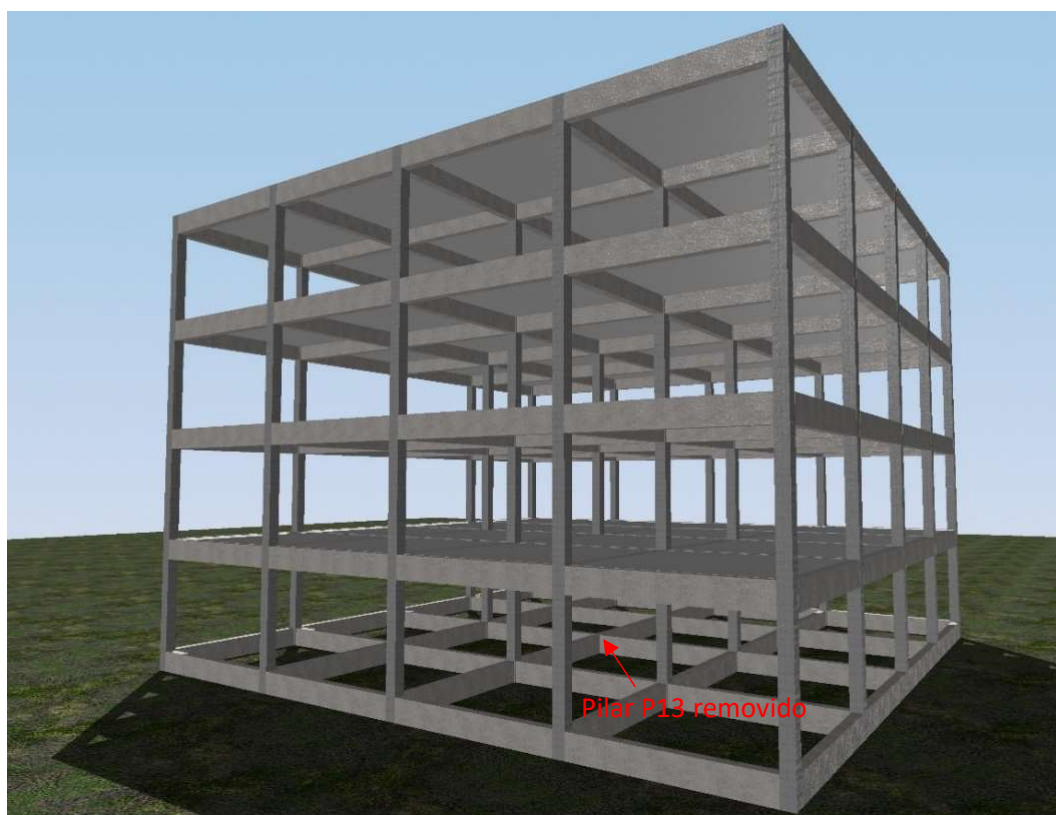
Fonte: Autora (2021).

Percebe-se que os pilares mais solicitados da estrutura são os pilares internos, P7, P8, P9, P12, P13, P14, P17, P18, e P19, com carregamentos que vão de 541,32 kN a 682,05 kN. Logo em seguida, em ordem decrescente de carregamentos, temos os pilares de extremidade P2, P3, P4, P6, P10, P11, P15, P16, P20, P22, P23 e P24 com carregamentos que variam entre 375,10 kN e 419,43 kN. Por fim os pilares menos solicitados são os pilares de canto P1, P5, P21 e P25 com esforços normais com valores entre 231,04 kN e 237,52 kN.

4.2 – EXEMPLO 2: EDIFÍCIO DE 4 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO PILAR P13

Para o estudo desse exemplo, foi utilizada a mesma estrutura do Exemplo 1, com exceção do pilar interno P13, que foi retirado no pavimento térreo, conforme mostra a Figura 25. As demais características do modelo estrutural, de geometria, materiais e carregamentos apresentados na seção 3.2 foram mantidas sem nenhuma alteração.

Figura 25 – Visualização 3D do Edifício de 4 pavimentos com remoção do pilar P13.

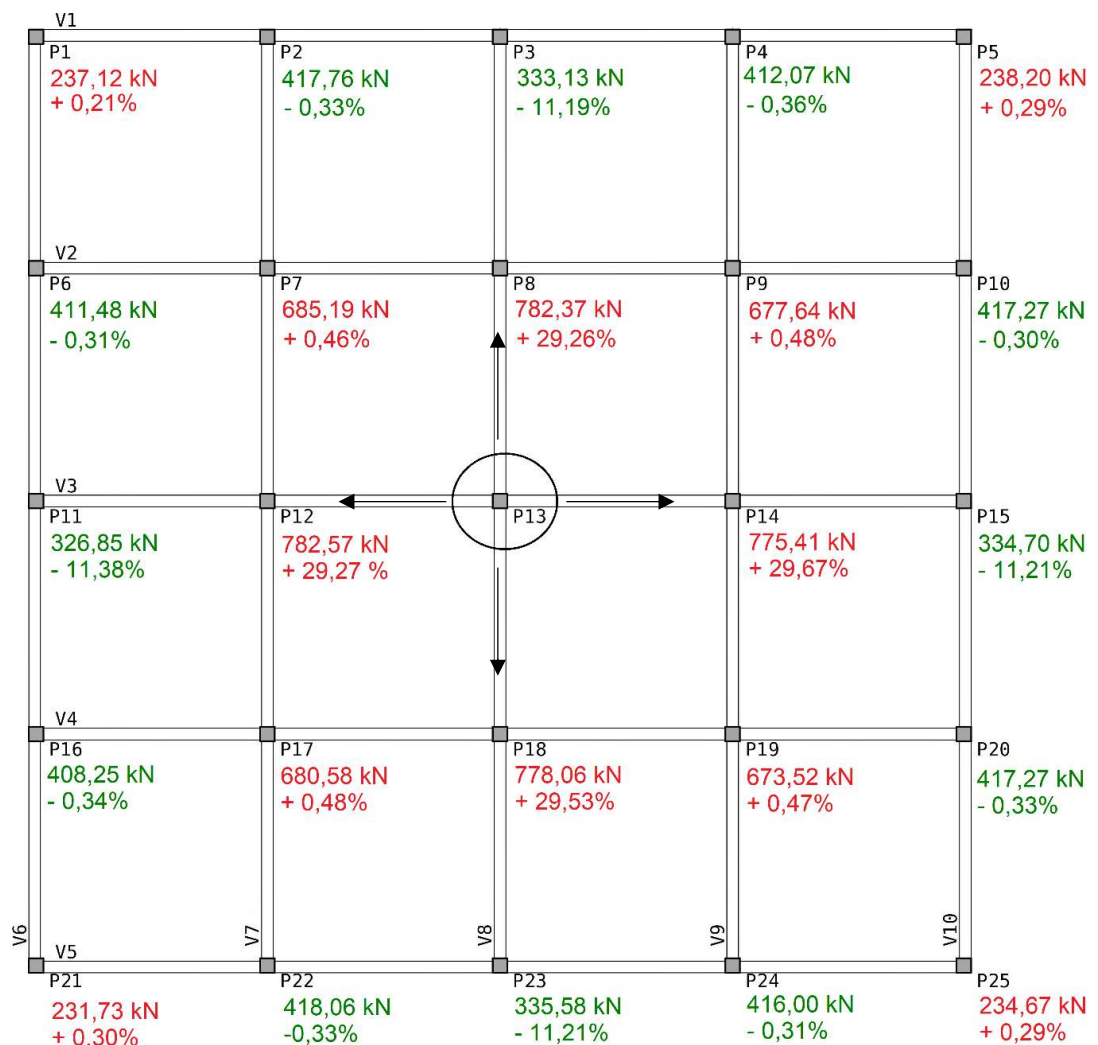


Fonte: Autora (2021).

4.2.1 – ANÁLISE DA REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS NORMAIS NOS PILARES

Na Figura 26 é representado um mapa dos esforços normais atuantes em cada pilar no pavimento térreo após a remoção do pilar P13, e suas respectivas variações de carga em comparação com o Exemplo 1. Na figura, a cor de carregamento vermelha indica aumento de carga e a cor verde indica redução no carregamento do pilar.

Figura 26 – Mapa dos carregamentos de esforços normais nos pilares do Exemplo 2 e suas respectivas variações em comparação com o Exemplo 1.



Fonte: Autora (2021).

Na tabela a seguir são mostrados os esforços normais atuantes nos pilares do Exemplo 1 e do Exemplo 2, e a variação de carga entre os dois casos.

Tabela 4 – Comparação de resultados dos Exemplos 1 e 2.

Pilar	Exemplo 1	Exemplo 2	Variação de carga (%)
P1	236,54	237,12	0,25
P2	419,13	417,76	-0,33
P3	375,10	333,13	-11,19
P4	413,54	412,07	-0,36
P5	237,52	238,20	0,29
P6	412,76	411,48	-0,31
P7	682,05	685,19	0,46
P8	605,26	782,37	29,26
P9	674,40	677,64	0,48
P10	418,55	417,27	-0,30
P11	368,83	326,85	-11,38
P12	605,36	782,57	29,27
P13	541,32	-	-
P14	598,01	775,41	29,67
P15	376,97	334,70	-11,21
P16	409,62	408,25	-0,34
P17	677,34	680,58	0,48
P18	600,65	778,06	29,53
P19	670,38	673,52	0,47
P20	418,64	417,27	-0,33
P21	231,04	231,73	0,30
P22	419,43	418,06	-0,33
P23	377,95	335,58	-11,21
P24	417,27	416,00	-0,31
P25	233,99	234,67	0,29

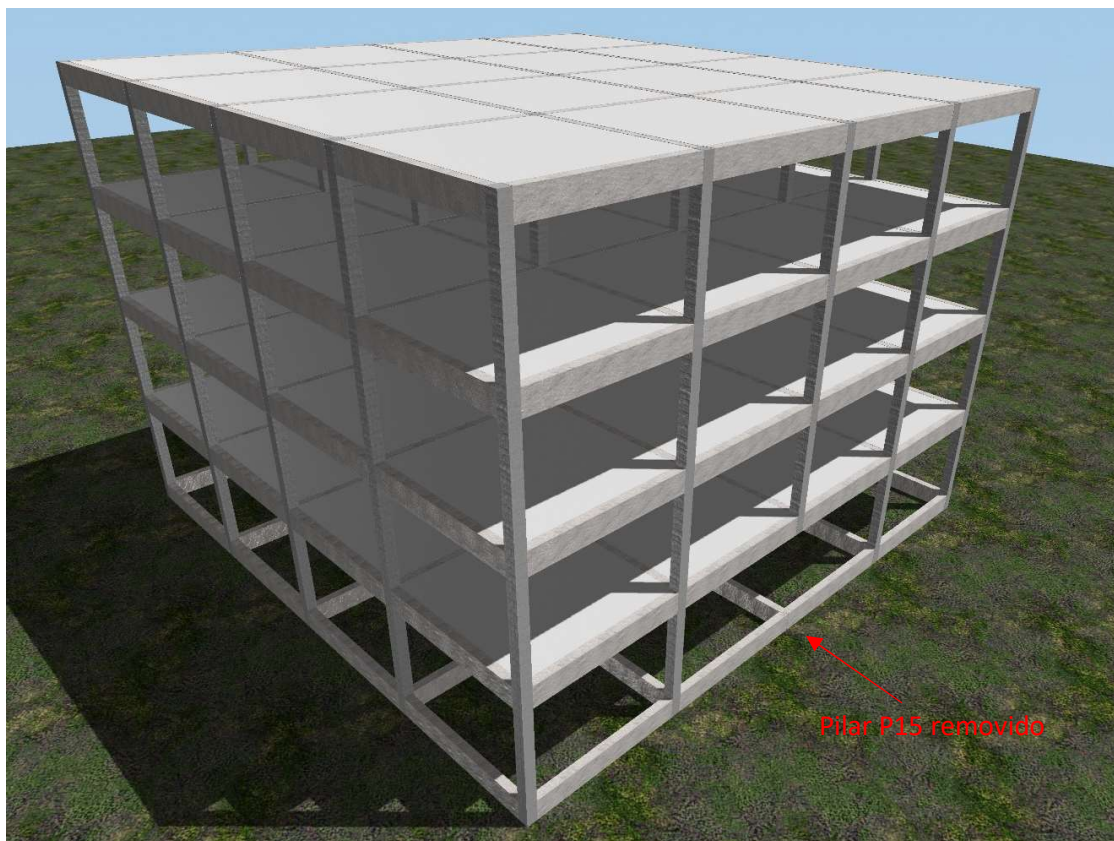
Fonte: Autora (2021).

Analisando a variação dos carregamentos, é possível verificar que a redistribuição de esforços após a remoção do elemento estrutural ocorre principalmente para os pilares adjacentes ligados diretamente por vigas ao P13, que são os pilares P8, P12, P14 e P18, que têm acréscimos de carga de em média 29,43%, enquanto nos pilares adjacentes a estes, que são os pilares P3, P11, P23 e P15 há um decréscimo de carga de em média 11,25%. Nos demais pilares, há pequenas variações de em média 0,35% de aumento ou redução de esforço normal.

4.3 – EXEMPLO 3: EDIFÍCIO DE 4 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO PILAR P15

Nesse exemplo, assim como no anterior foi utilizada a mesma estrutura do Exemplo 1, mas agora retirando-se o pilar de extremidade P15, no pavimento térreo, conforme mostrado na Figura 27.

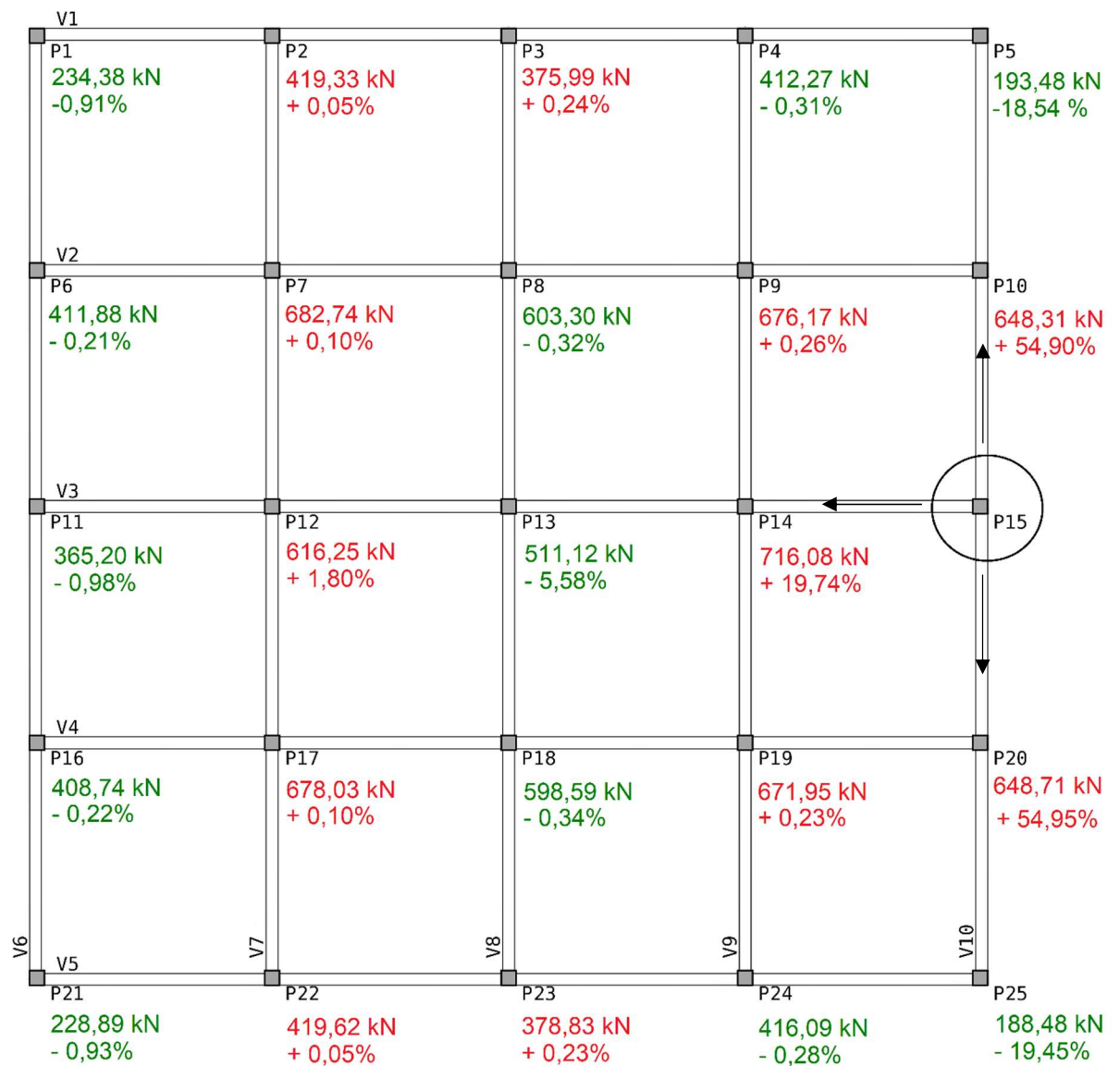
Figura 27 – Visualização 3D do Edifício de 4 pavimentos com remoção do P15.



4.3.1 – ANÁLISE DA REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS NORMAIS NOS PILARES

Na Figura 28 é mostrado o mapa dos esforços normais atuantes em cada pilar no pavimento térreo após a remoção do pilar P15, e suas respectivas variações de carga em comparação com o Exemplo 1.

Figura 28 - Mapa dos carregamentos de esforço normal nos pilares do Exemplo 3 e suas respectivas variações em comparação com o Exemplo 1.



Fonte: Autora (2021).

Na Tabela 5 são mostrados os valores de esforço normal para cada pilar no Exemplo 1 e no Exemplo 3 e a variação de carga entre os dois casos.

Tabela 5 – Comparação de resultados dos Exemplos 1 e 3.

Pilar	Exemplo 1	Exemplo 3	Variação de carga (%)
P1	236,54	234,38	-0,91
P2	419,13	419,33	0,05
P3	375,10	375,99	0,24
P4	413,54	412,27	-0,31
P5	237,52	193,48	-18,54
P6	412,76	411,88	-0,21
P7	682,05	682,74	0,10
P8	605,26	603,30	-0,32
P9	674,40	676,17	0,26
P10	418,55	648,31	54,90
P11	368,83	365,20	-0,98
P12	605,36	616,25	1,80
P13	541,32	511,12	-5,58
P14	598,01	716,08	19,74
P15	376,97	-	-
P16	409,62	408,74	-0,22
P17	677,34	678,03	0,10
P18	600,65	598,59	-0,34
P19	670,38	671,95	0,23
P20	418,64	648,71	54,95
P21	231,04	228,89	-0,93
P22	419,43	419,62	0,05
P23	377,95	378,83	0,23
P24	417,27	416,09	-0,28
P25	233,99	188,48	-19,45

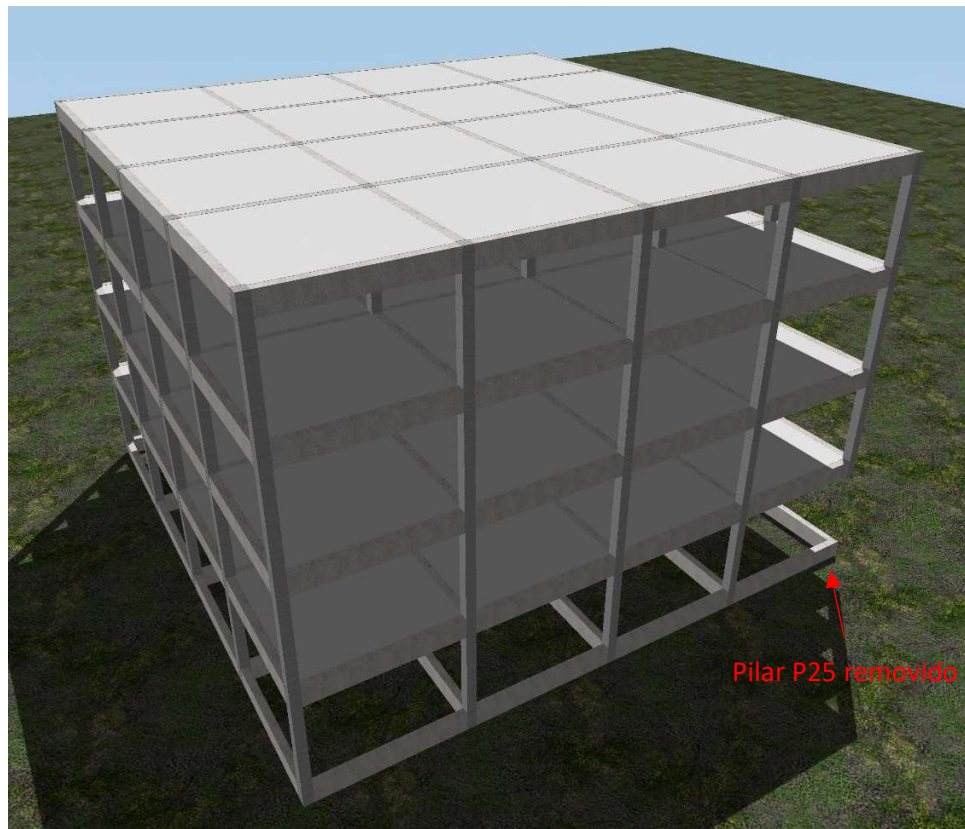
Fonte: Autora (2021).

A partir da Figura 28 e da Tabela 5 podemos observar que assim como visto anteriormente, a redistribuição de esforços se dá majoritariamente aos pilares diretamente ligados ao pilar removido, nesse caso são os pilares P10, P14 e P20, que tiveram variações de 54,90%, 19,74% e 54,95% respectivamente, tendo uma média de 43,20% de acréscimo de esforço normal. Os pilares P5, P13 e P25, que são pilares seguintes aos pilares com os maiores acréscimos de carga, tiveram redução de carga de 18,54%, 5,58% e 19,45% respectivamente. Enquanto o restante dos pilares, tiveram variações pouco significativas nos seus valores de esforço normal, inferiores a 1%.

4.4 – EXEMPLO 4: EDIFÍCIO DE 4 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO PILAR P25

No Exemplo 4, também foi utilizada a mesma estrutura do Exemplo 1, mas agora com a remoção do pilar de canto P25, conforme mostra a Figura 29.

Figura 29 – Visualização 3D do Edifício de 4 pavimentos com a remoção do pilar P25.

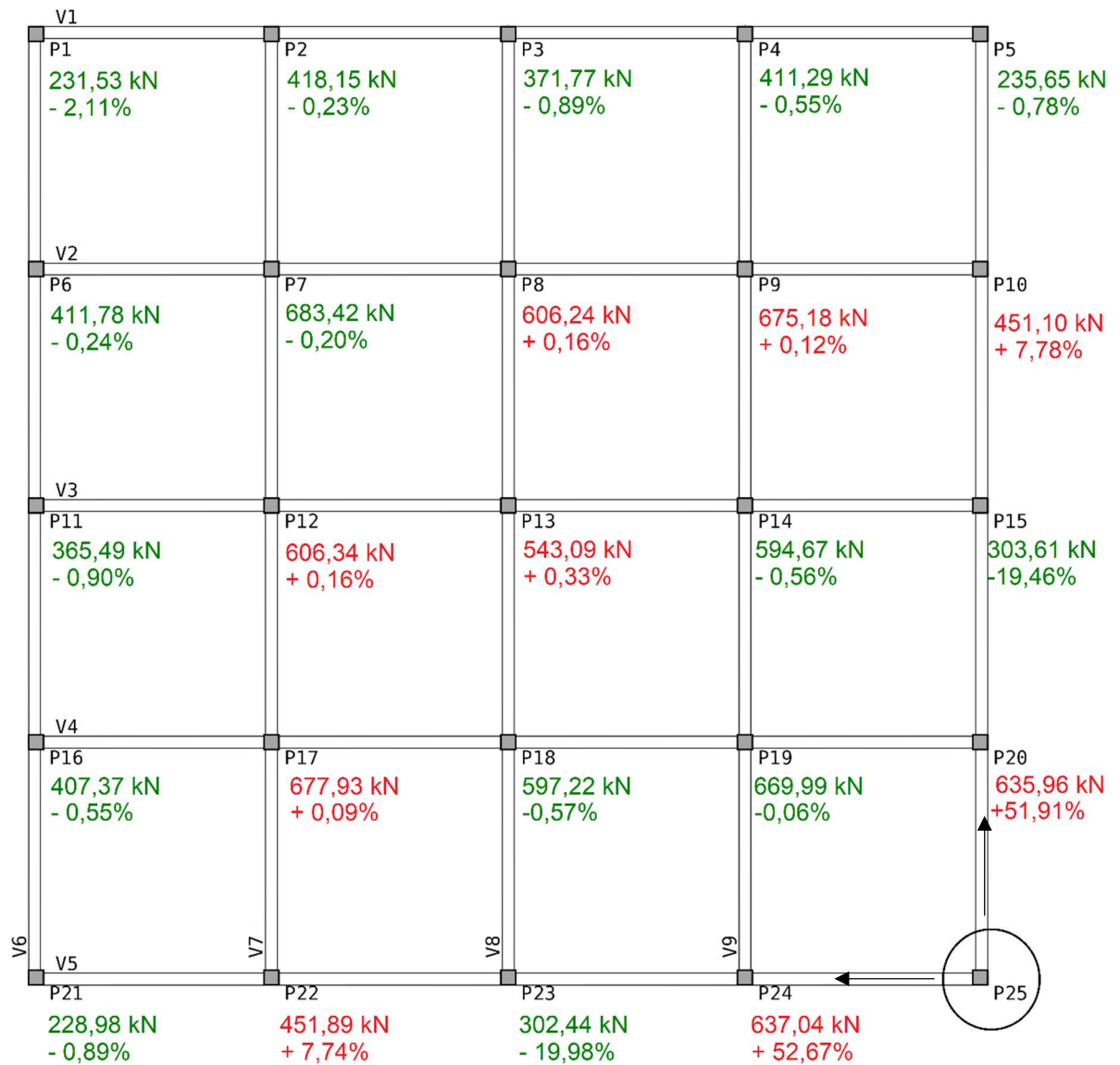


Fonte: Autora (2021).

4.4.1 – ANÁLISE DA REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS NORMAIS NOS PILARES

Assim como nos exemplos anteriores, foi elaborado um mapa dos esforços normais solicitantes em cada pilar e suas respectivas variações de carga, conforme mostra a Figura 30, dessa vez para a situação da estrutura após a remoção do pilar P25.

Figura 30 – Mapa dos carregamentos de esforço normal nos pilares do Exemplo 4 e suas respectivas variações em comparação com o Exemplo 1.



Fonte: Autora (2021).

A Tabela 6 traz uma comparação dos esforços normais atuantes nos pilares antes e depois da remoção pilar P25, mostrando a porcentagem de variação de carga entre os Exemplos 1 e 4.

Tabela 6 – Comparação dos resultados dos Exemplos 1 e 4.

Pilar	Exemplo 1	Exemplo 4	Variação de carga (%)
P1	236,54	231,53	-2,11
P2	419,13	418,15	-0,23
P3	375,10	371,77	-0,89
P4	413,54	411,29	-0,55
P5	237,52	235,65	-0,78
P6	412,76	411,78	-0,24
P7	682,05	683,42	0,20
P8	605,26	606,24	0,16
P9	674,40	675,18	0,12
P10	418,55	451,10	7,78
P11	368,83	365,49	-0,90
P12	605,36	606,34	0,16
P13	541,32	543,09	0,33
P14	598,01	594,67	-0,56
P15	376,97	303,61	-19,46
P16	409,62	407,37	-0,55
P17	677,34	677,93	0,09
P18	600,65	597,22	-0,57
P19	670,38	669,99	-0,06
P20	418,64	635,96	51,91
P21	231,04	228,98	-0,89
P22	419,43	451,89	7,74
P23	377,95	302,44	-19,98
P24	417,27	637,04	52,67
P25	233,99	-	-

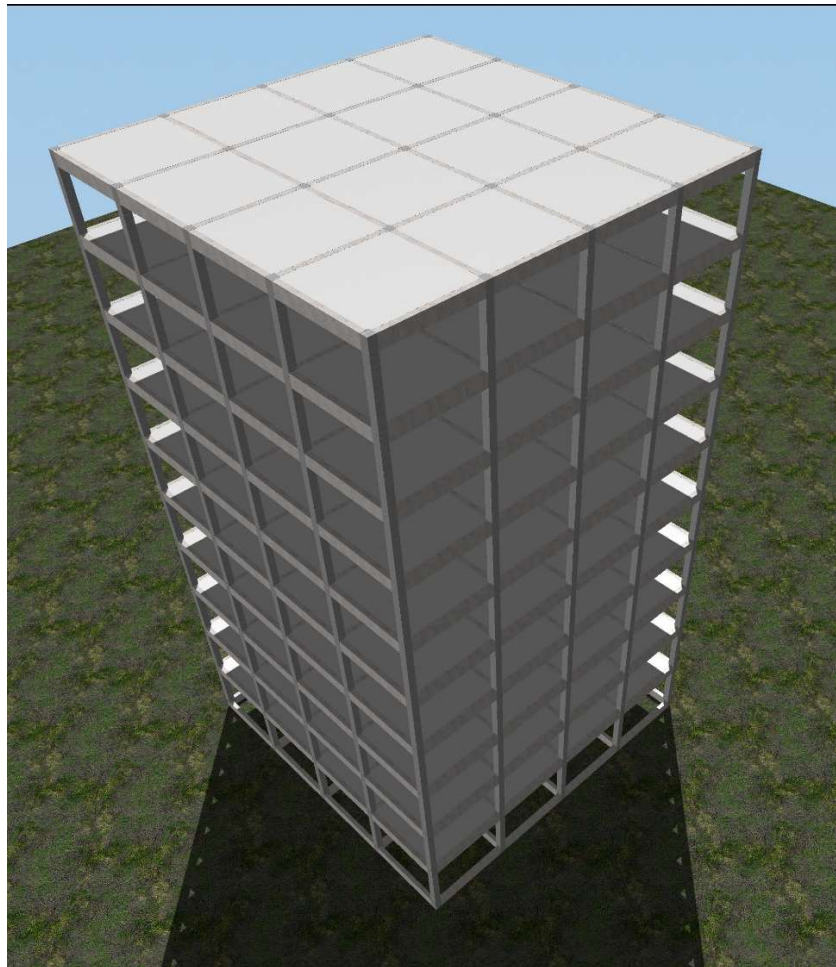
Fonte: Autora (2021).

Na Figura 30 e na Tabela 6 podemos observar que os pilares que tiveram maiores aumentos de carga foram os pilares P20 e P24, com uma média de 52,29% de acréscimo de carga, fica assim mais uma vez comprovado que a redistribuição de esforços após a supressão de um elemento estrutural, ocorre principalmente aos elementos estruturais adjacentes ligados diretamente ao elemento suprimido. Os pilares P15 e P23, que são os pilares seguintes aos pilares P20 e P24 no mesmo alinhamento do pilar removido, tiveram uma redução de 19,46% e 19,98% nos seus carregamentos, respectivamente. Os pilares P10 e P22 também sofreram um aumento de esforço normal, de 7,78% e 7,74%, respectivamente. O restante dos pilares, apresentaram variações pouco significativas em seus carregamentos, com média de 0,52% de variação em comparação com o Exemplo 1.

4.5 – EXEMPLO 5: EDIFÍCIO DE 10 PAVIMENTOS SITUAÇÃO ORIGINAL

Para a realização desse exemplo, foram realizadas algumas modificações na estrutura apresentada em 3.2. Primeiramente foi modificada a quantidade de pavimentos da edificação, que agora possui 10 pavimentos, conforme mostram as Figuras 31 e 32.

Figura 31 – Visualização 3D do Edifício de 10 pavimentos em situação original.



Fonte: Autora (2021).

Figura 32 – Corte esquemático do edifício com 10 pavimentos (sem escala, dimensões em metros).



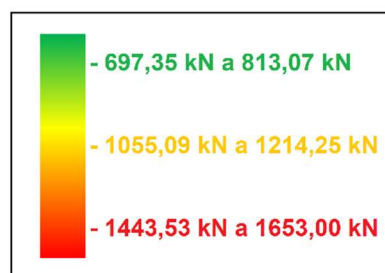
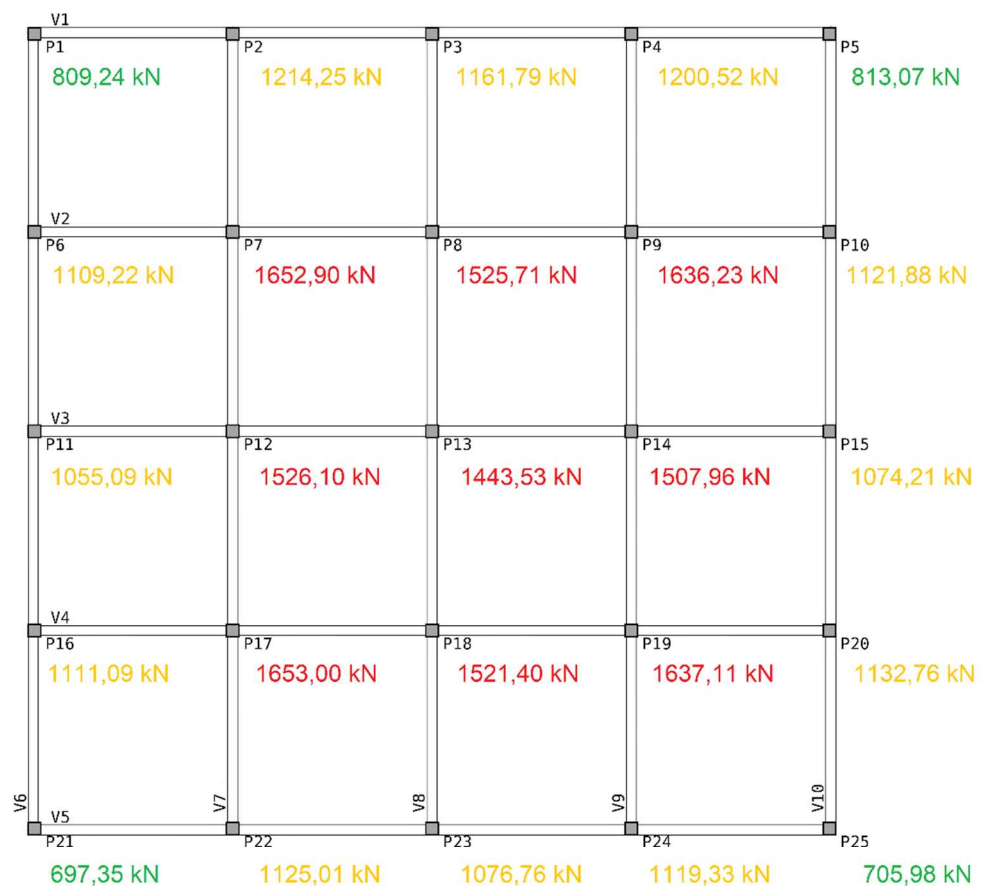
Fonte: Autora (2021).

Também foi realizada modificação na seção transversal dos pilares, que antes possuíam seção transversal de 25 x 25 cm e nessa nova configuração passam a possuir seção de 30 x 30 cm. O restante das características de geometria, materiais e carregamentos da estrutura apresentados na seção 3.2 foram mantidos sem nenhuma alteração.

4.5.1 – ANÁLISE DOS ESFORÇOS NORMAIS SOLICITANTES NOS PILARES

Após o processamento do edifício no software TQS, foi realizada a análise dos esforços normais atuantes em cada pilar do pavimento térreo no relatório de pilares produzido pelo TQS, a Figura 33 mostra os maiores valores de esforço normal obtidos entre as diversas combinações de carregamentos geradas pelo TQS para cada pilar. A cor do carregamento de cada pilar varia conforme a sua magnitude, em que verde representa as menores magnitudes e vermelho as maiores.

Figura 33 – Esforços normais atuantes nos pilares do Exemplo 5.



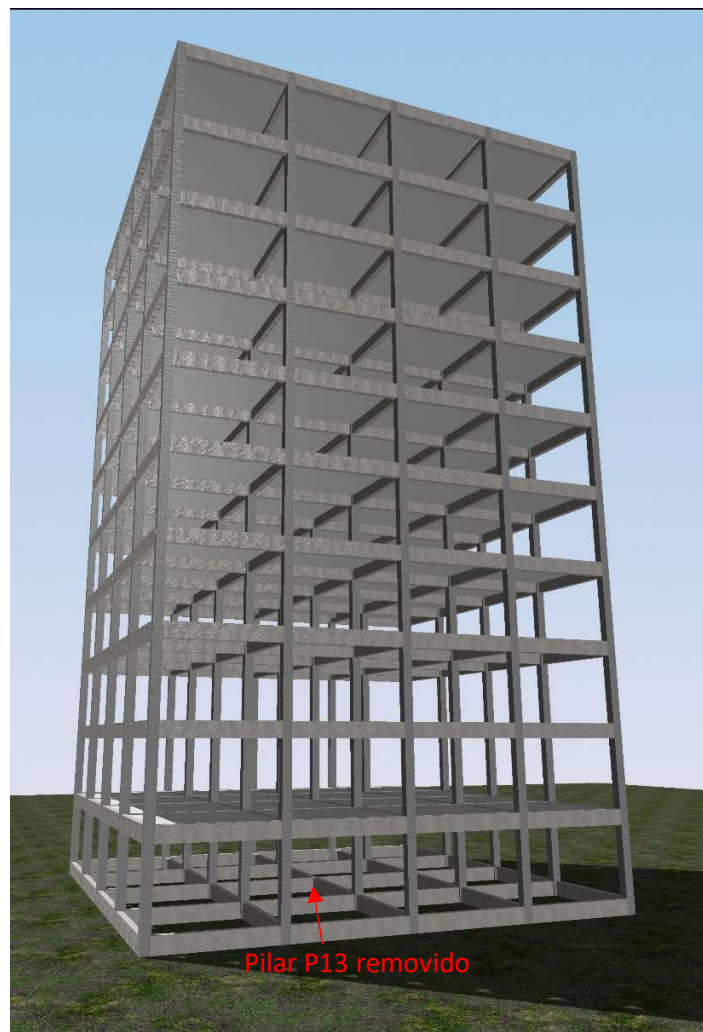
Fonte: Autora (2020).

Podemos observar que os pilares mais solicitados do pavimento são os pilares internos, P7, P8, P9, P12, P13, P14, P17, P18 e P19 com carregamentos que vão de 1443,53 kN a 1653,00 kN. Em seguida, temos os pilares de extremidade, P2, P3, P4, P6, P10, P11, P15, P16, P20, P22, P23 e P4 que apresentam valores entre 1055,09 kN e 1214,25 kN, e por último os pilares menos solicitados são os pilares de canto P1, P5, P21 e P25, com esforços normais entre 697,35 kN e 813,07 kN.

4.6 – EXEMPLO 6: EDIFÍCIO DE 10 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO PILAR P13

Nesse exemplo, foi utilizado o mesmo modelo de edifício do Exemplo 5, com exceção do pilar interno P13, que foi retirado do pavimento térreo, conforme mostra a Figura 34.

Figura 34 – Visualização 3D do edifício de 10 pavimentos com a remoção do pilar P13.

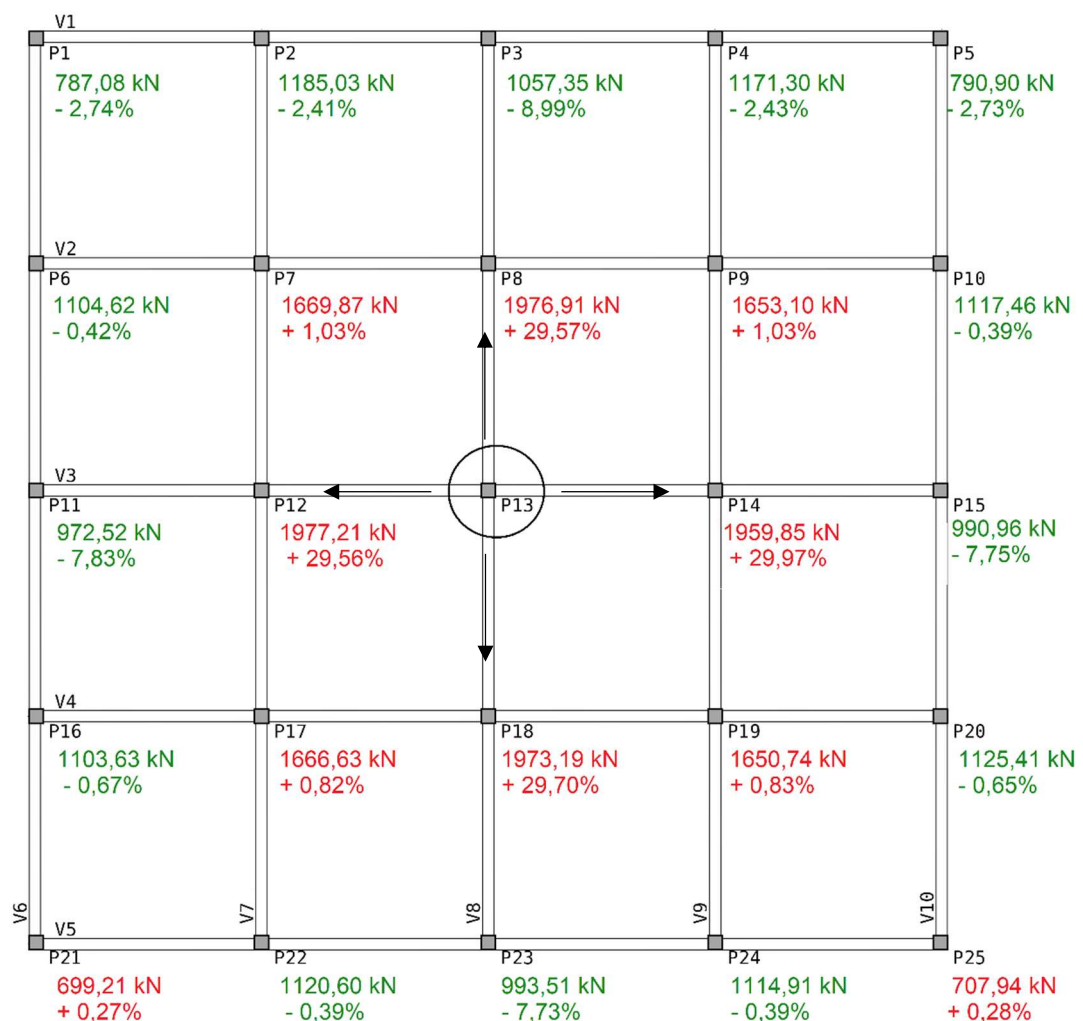


Fonte: Autora (2021)

4.6.1 – ANÁLISE DA REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS NORMAIS NOS PILARES

Após a remoção do pilar P13, o edifício de 10 pavimentos foi novamente processado no software TQS, que gerou um novo relatório com dados dos pilares, a Figura 35 traz os valores de esforços normais em cada pilar no pavimento térreo, com a nova configuração sem o Pilar P13, a imagem apresenta também a porcentagem de variação desses carregamentos em comparação com o Exemplo 5. Os carregamentos que são apresentados na cor vermelha, indicam um aumento nos valores de esforço normal, enquanto os valores apresentados em verde, indicam uma redução nesse carregamento.

Figura 35 – Mapa dos carregamentos de esforço normal nos pilares do Exemplo 6, e sua respectiva variação em comparação com o Exemplo 5.



Fonte: Autora (2021).

A Tabela 7 mostra os esforços normais atuantes nos pilares dos Exemplos 5 e 6, apontando a variação de cargas entre os dois exemplos.

Tabela 7 – Comparação dos resultados dos Exemplos 5 e 6.

Pilar	Exemplo 5	Exemplo 6	Variação de carga (%)
P1	809,24	787,08	-2,74
P2	1214,25	1185,03	-2,41
P3	1161,79	1057,35	-8,99
P4	1200,52	1171,30	-2,43
P5	813,07	790,90	-2,73
P6	1109,22	1104,62	-0,42
P7	1652,90	1669,87	1,03
P8	1525,71	1976,91	29,57
P9	1636,23	1653,10	1,03
P10	1121,88	1117,46	-0,39
P11	1055,09	972,52	-7,83
P12	1526,10	1977,21	29,56
P13	1443,53	-	-
P14	1507,96	1959,85	29,97
P15	1074,21	990,96	-7,75
P16	1111,09	1103,63	-0,67
P17	1653,00	1666,63	0,82
P18	1521,40	1973,19	29,70
P19	1637,11	1650,74	0,83
P20	1132,76	1125,41	-0,65
P21	697,35	699,21	0,27
P22	1125,01	1120,60	-0,39
P23	1076,76	993,51	-7,73
P24	1119,33	1114,91	-0,39
P25	705,98	707,94	0,28

Fonte: Autora (2021).

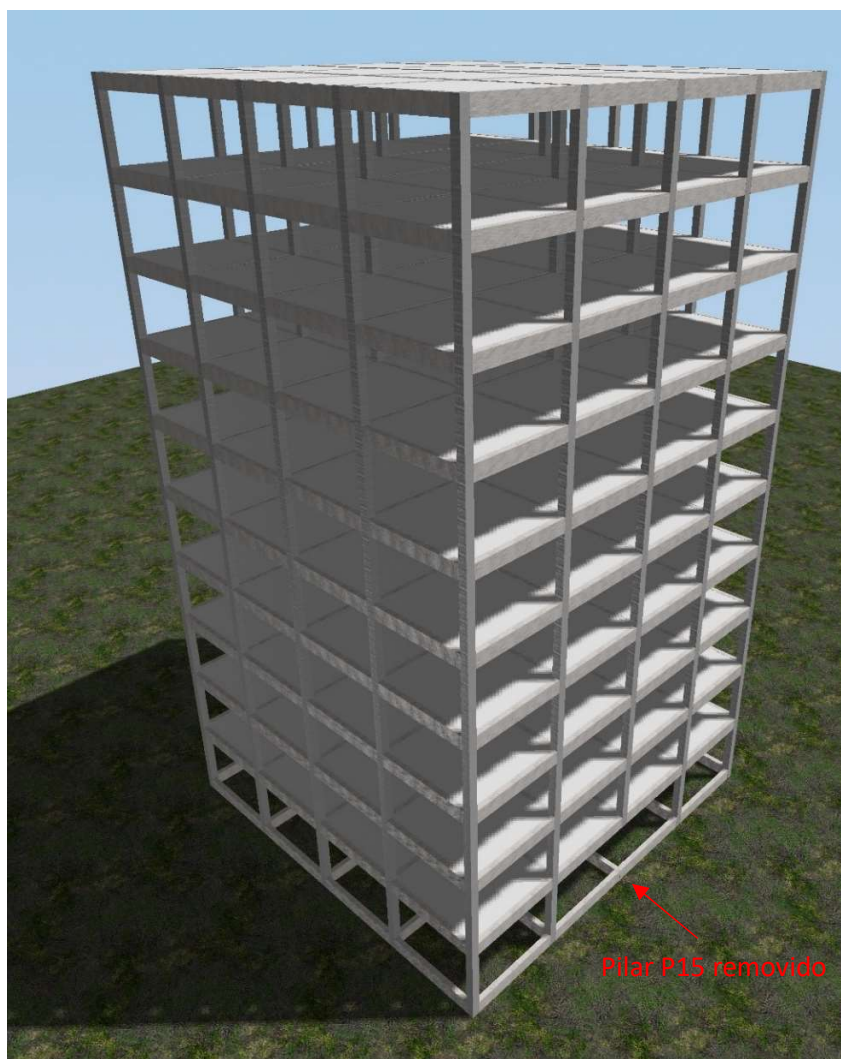
Analisando os resultados apresentados na Figura 35 e na Tabela 7, podemos verificar que após a remoção do pilar P13, a redistribuição de esforços ocorreu de forma preponderante aos pilares adjacentes que eram antes ligados diretamente por

vigas ao pilar P13, que são eles os pilares P8, P12, P14 e P18, que tiveram incrementos de carga de 29,57%, 29,56%, 29,97% e 29,70%, respectivamente. Os pilares P7, P9, P17, P19, P21 e P25 tiveram pequenos acréscimos de carga, de em média 0,71%. O restante dos pilares apresentaram diminuição em seus valores de esforço normal, sendo os pilares P3, P11, P15 e P23 os que apresentaram as maiores reduções de carga, de 8,99%, 7,83%, 7,75% e 7,73%, respectivamente.

4.7 – EXEMPLO 7: EDIFÍCIO DE 10 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO PILAR P15

De forma análoga ao exemplo anterior, no Exemplo 7 foi utilizado o mesmo modelo de edifício do Exemplo 5, mas dessa vez com a remoção do pilar de extremidade P15 no pavimento térreo, conforme mostrado na Figura 36.

Figura 36 – Visualização 3D do edifício de 10 pavimentos com remoção do pilar P15.

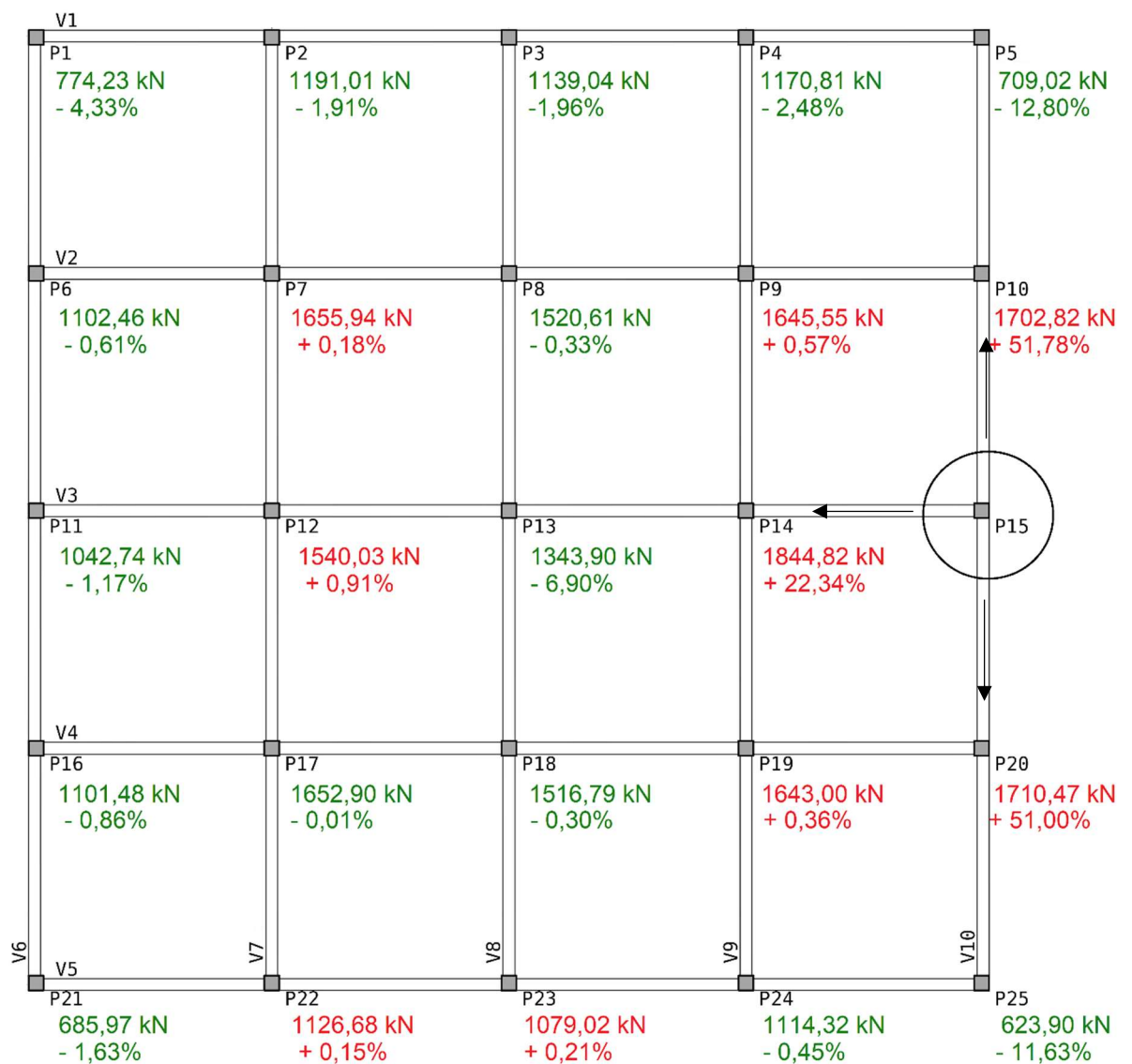


Fonte: Autora (2021).

4.7.1 – ANÁLISE DA REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS NORMAIS NOS PILARES

Para análise da redistribuição de esforços após a remoção do pilar P15, foi elaborado um mapa dos carregamentos de esforço normal nos pilares, apresentando a variação dos esforços atuantes em cada pilar em relação a situação original mostrada no Exemplo 5, esse mapa é ilustrado a seguir.

Figura 37 – Mapa dos carregamentos de esforço normal nos pilares do Exemplo 7, e suas respectivas variações em comparação com o Exemplo 5.



Fonte: Autora (2021).

A Tabela 8 faz uma comparação dos carregamentos dos pilares do Exemplo 5, com os carregamentos dos pilares obtidos no Exemplo 7.

Tabela 8 – Comparação dos resultados dos Exemplos 5 e 7.

Pilar	Exemplo 5	Exemplo 7	Variação de carga (%)
P1	809,24	774,23	-4,33
P2	1214,25	1191,01	-1,91
P3	1161,79	1139,04	-1,96
P4	1200,52	1170,81	-2,48
P5	813,07	709,02	-12,80
P6	1109,22	1102,46	-0,61
P7	1652,90	1655,94	0,18
P8	1525,71	1520,61	-0,33
P9	1636,23	1645,55	0,57
P10	1121,88	1702,82	51,78
P11	1055,09	1042,74	-1,17
P12	1526,10	1540,03	0,91
P13	1443,53	1343,90	-6,90
P14	1507,96	1844,82	22,34
P15	1074,21	-	-
P16	1111,09	1101,48	-0,86
P17	1653,00	1652,90	-0,01
P18	1521,40	1516,79	-0,30
P19	1637,11	1643,00	0,36
P20	1132,76	1710,47	51,00
P21	697,35	685,97	-1,63
P22	1125,01	1126,68	0,15
P23	1076,76	1079,02	0,21
P24	1119,33	1114,32	-0,45
P25	705,98	623,90	-11,63

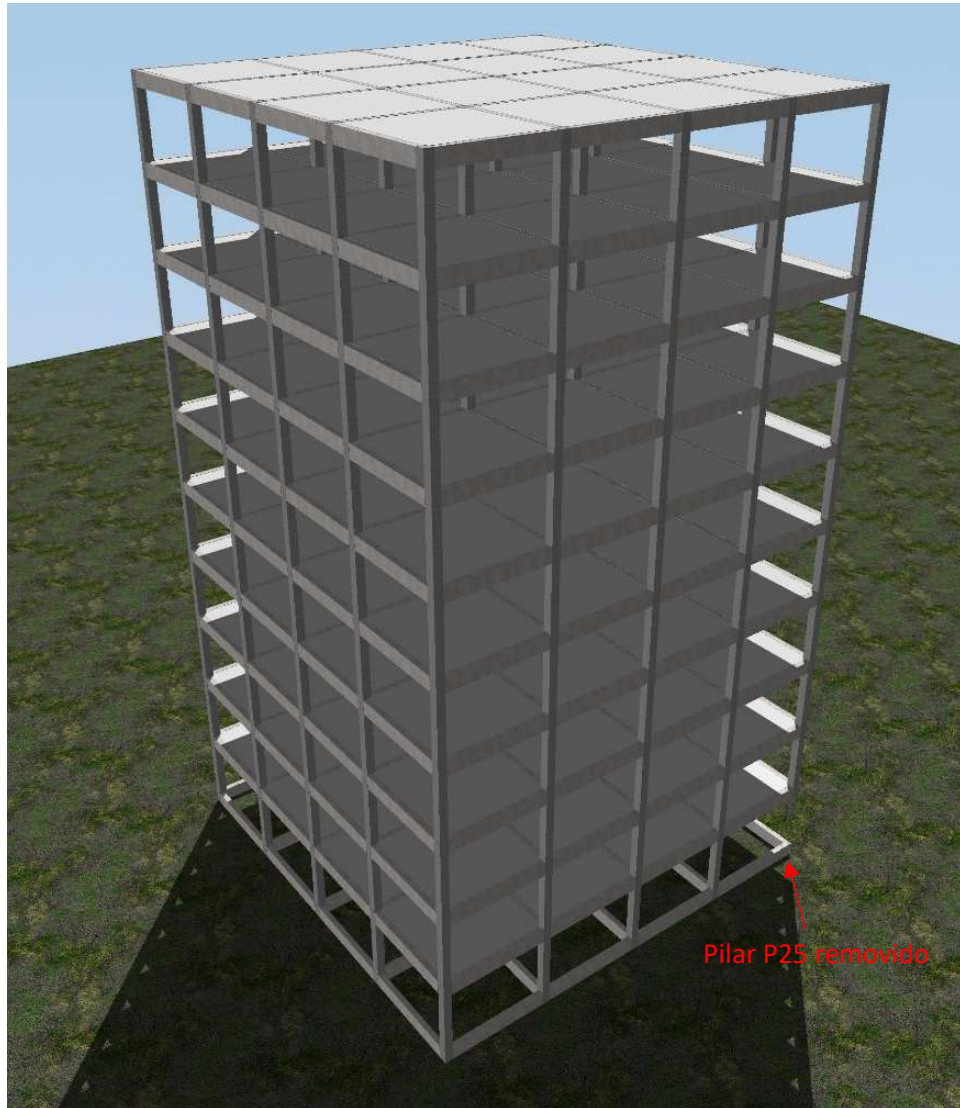
Fonte: Autora (2021).

A comparação dos resultados obtidos no Exemplo 5 e Exemplo 7 constata mais uma vez, que a redistribuição de esforços após a remoção do pilar, se dá principalmente aos elementos adjacentes ligados diretamente ao pilar removido, que nesse caso são os pilares P10, P14 e P20, que tiveram acréscimos de 51,78%, 22,34% e 51,00%, respectivamente. Os pilares P5, P13 e P25 tiveram uma redução de 12,80%, 6,90% e 11,63%, respectivamente, em seus esforços normais. Os demais pilares apresentaram pequenas variações, inferiores a 2,5%.

4.8 – EXEMPLO 8: EDIFÍCIO DE 10 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO PILAR P25

No Exemplo 8, foi realizada a remoção do pilar de canto P25 da estrutura padrão apresentada no Exemplo 5. Na Figura 38 podemos observar o edifício com o pilar P25 removido.

Figura 38 – Visualização 3D do edifício de 10 pavimentos com a remoção do pilar P25.

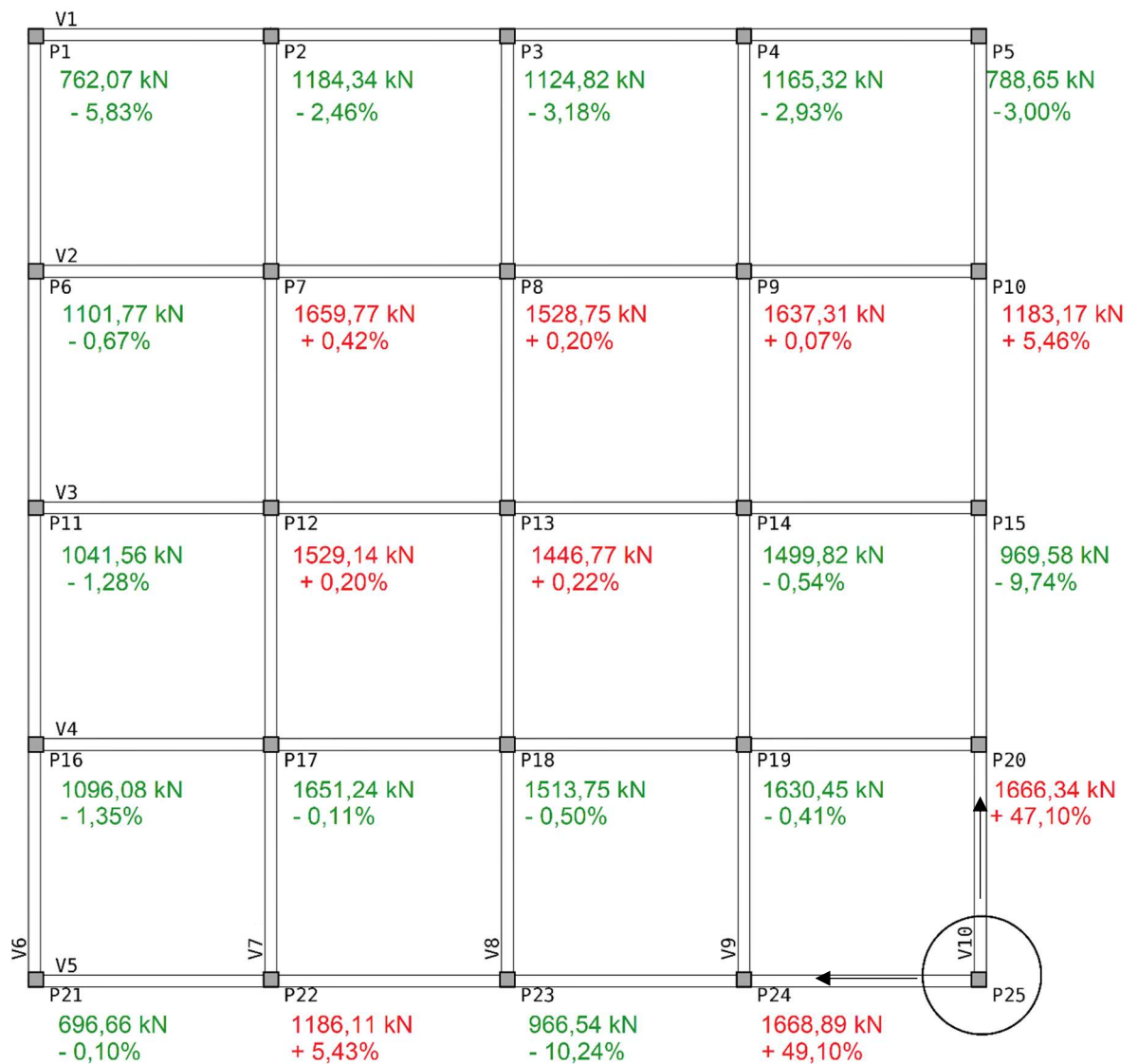


Fonte: Autora (2021).

4.8.1 – ANÁLISE DA REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS NORMAIS NOS PILARES

A Figura 39 traz as novas solicitações verticais atuantes nos pilares após a remoção do pilar P25, e a porcentagem de variação nesses carregamentos em comparação com a situação original com a presença de todos os pilares.

Figura 39 – Mapa dos carregamentos de esforço normal nos pilares do Exemplo 8, e suas respectivas variações em comparação com o Exemplo 5.



Fonte: Autora (2021).

A Tabela 9 faz uma comparação dos carregamentos verticais nos pilares do Exemplo 5 e Exemplo 8.

Tabela 9 – Comparação dos resultados dos Exemplos 5 e 8.

Pilar	Exemplo 5	Exemplo 8	Variação de carga (%)
P1	809,24	762,07	-5,83
P2	1214,25	1184,34	-2,46
P3	1161,79	1124,82	-3,18
P4	1200,52	1165,32	-2,93
P5	813,07	788,65	-3,00
P6	1109,22	1101,77	-0,67
P7	1652,90	1659,77	0,42
P8	1525,71	1528,75	0,20
P9	1636,23	1637,31	0,07
P10	1121,88	1183,17	5,46
P11	1055,09	1041,56	-1,28
P12	1526,10	1529,14	0,20
P13	1443,53	1446,77	0,22
P14	1507,96	1499,82	-0,54
P15	1074,21	969,58	-9,74
P16	1111,09	1096,08	-1,35
P17	1653,00	1651,24	-0,11
P18	1521,40	1513,75	-0,50
P19	1637,11	1630,45	-0,41
P20	1132,76	1666,34	47,10
P21	697,35	696,66	-0,10
P22	1125,01	1186,11	5,43
P23	1076,76	966,54	-10,24
P24	1119,33	1668,89	49,10
P25	705,98	-	-

Fonte: Autora (2021).

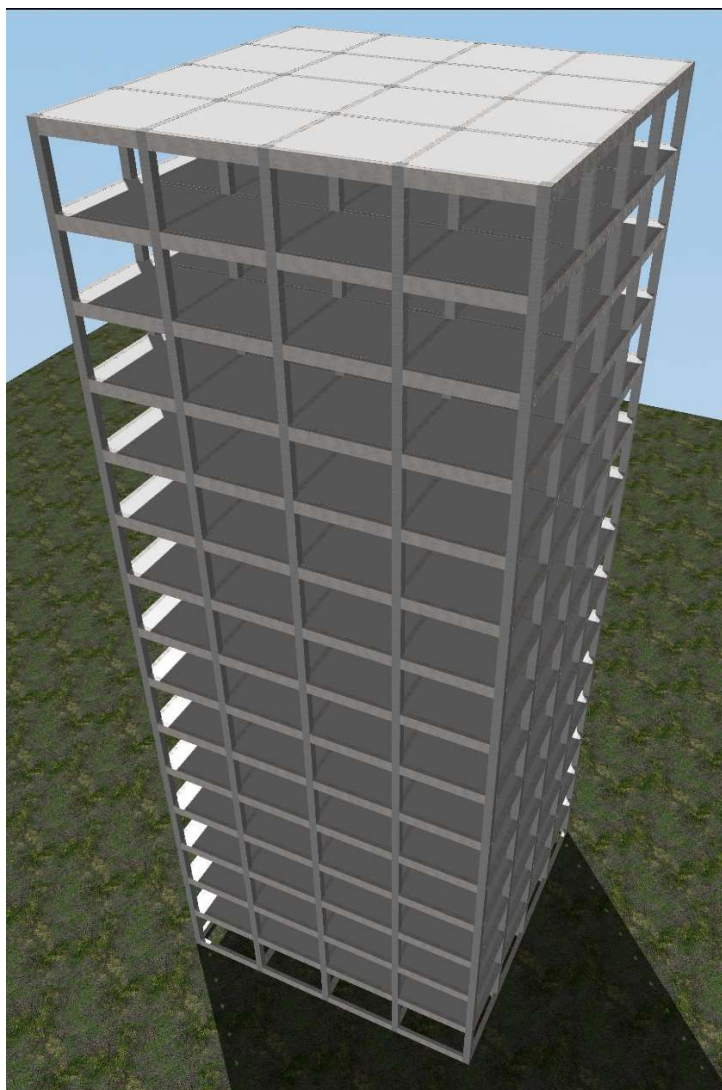
Fazendo uma análise da Figura 39 e da Tabela 9, podemos verificar que os pilares que apresentaram maior aumento em seus valores de esforço normal foram os pilares adjacentes diretamente ligados ao pilar removido, que são os pilares P20 e P24, com acréscimos de 47,10% e 49,10%, respectivamente. Os outros pilares não tiveram acréscimos maiores 6%. Alguns pilares apresentaram diminuição em seus carregamentos, principalmente os pilares P15 e P23, que tiveram redução de 9,74% e 10,24% em suas solicitações verticais.

4.9 – EXEMPLO 9: EDIFÍCIO DE 15 PAVIMENTOS EM SITUAÇÃO ORIGINAL

A partir do modelo estrutural elaborado e apresentado na seção 3.2 foram promovidas modificações, no número de pavimentos e na seção transversal dos pilares. O edifício passa a ter agora 15 pavimentos, e seus pilares possuem seção transversal de 35 x 35 cm, as demais características da estrutura, de geometria, materiais e carregamentos adotados foram mantidas sem nenhuma alteração.

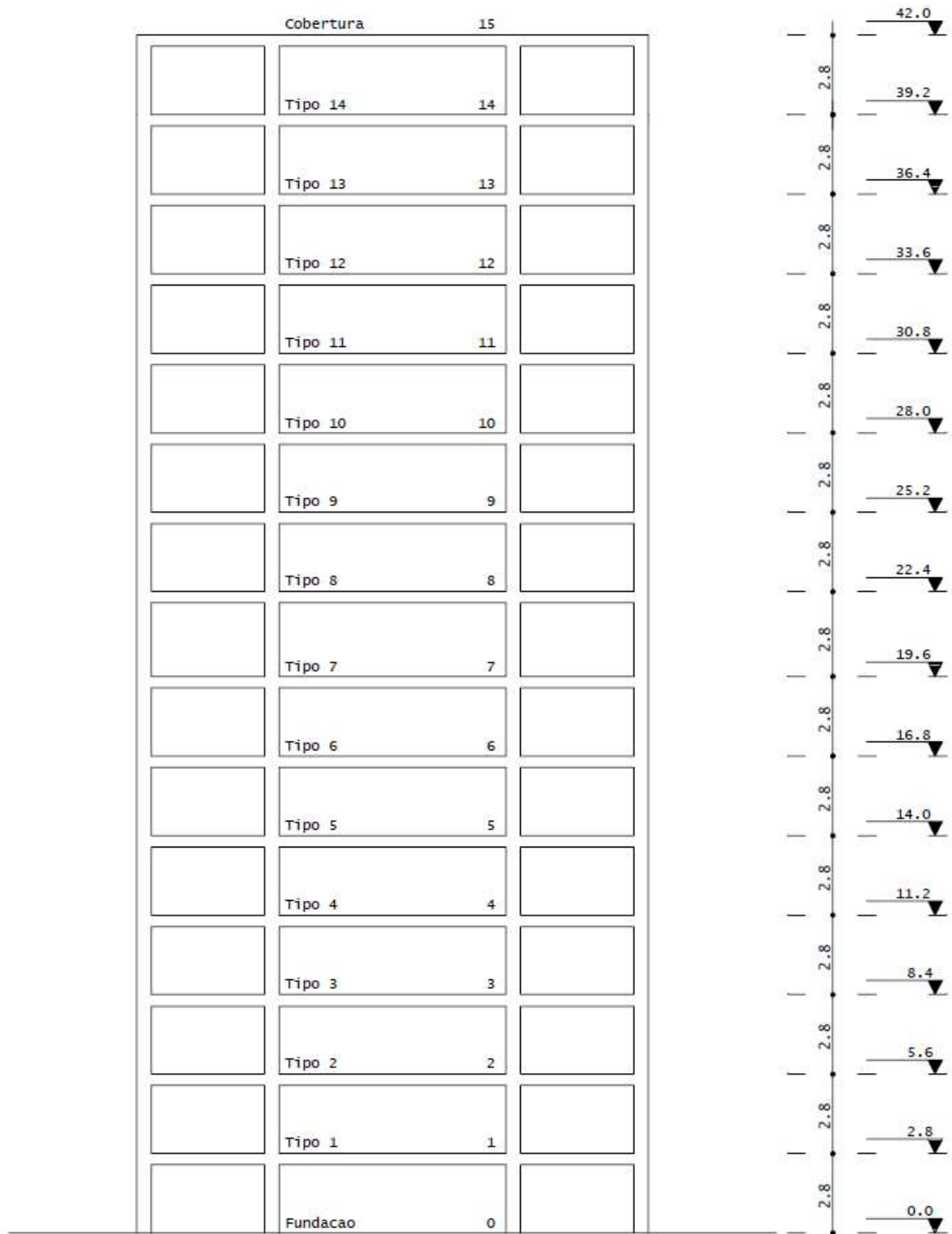
Esse novo modelo estrutural de 15 pavimentos, também será adotado no Exemplo 10, em que será feita a remoção do pilar interno P13, no Exemplo 11 em que será removido o pilar de extremidade P15 e por fim no Exemplo 12 que o pilar removido será o pilar de canto P25. O modelo estrutural é mostrado nas Figuras 40 e 41.

Figura 40 – Visualização 3D do Edifício Exemplo 9 de 15 pavimentos.



Fonte: Autora (2021).

Figura 41 – Corte esquemático do edifício com 15 pavimentos (sem escala, dimensões em metros).

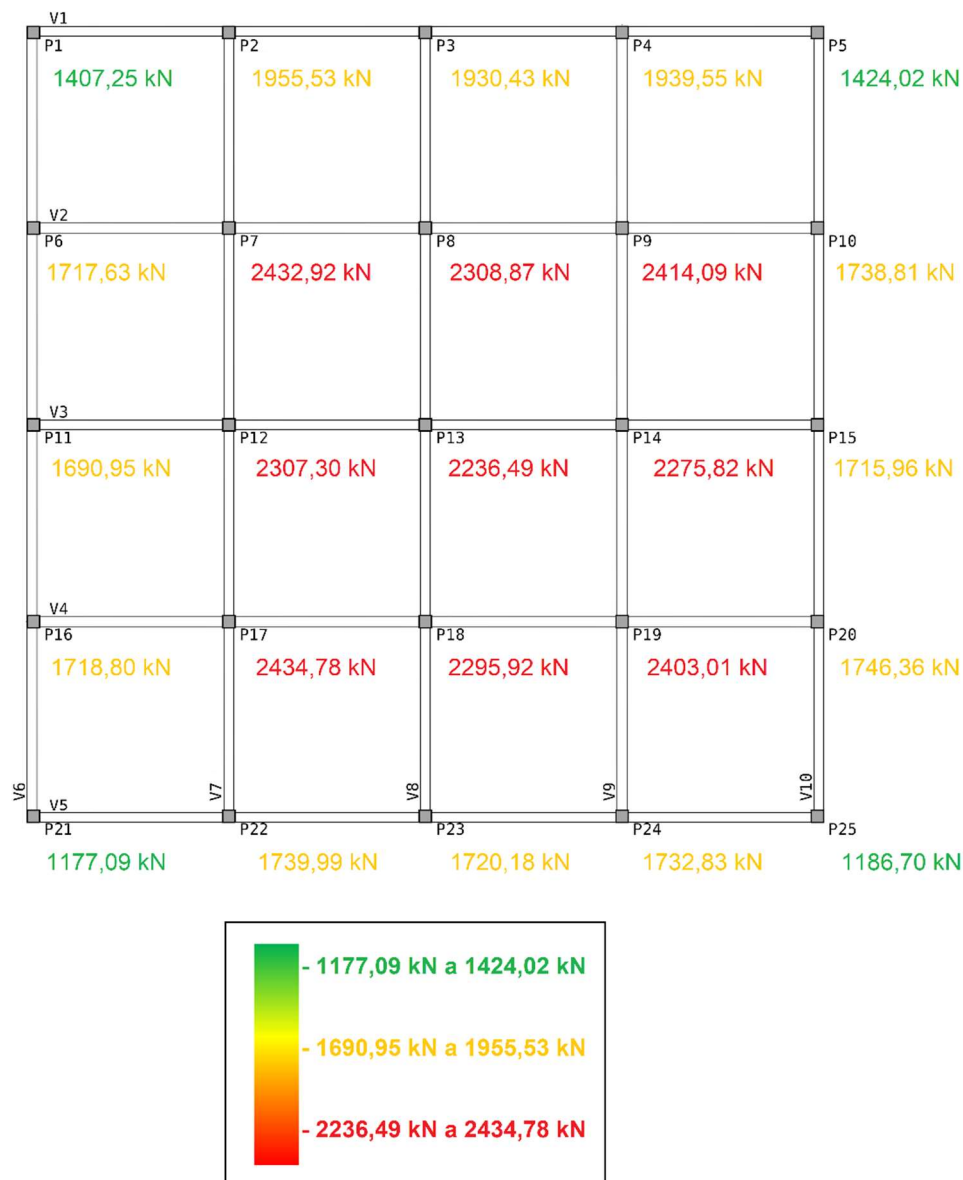


Fonte Autora (2021).

4.9.1 – ANÁLISE DOS ESFORÇOS NORMAIS SOLICITANTES NOS PILARES

Após o processamento do novo edifício no software TQS, o programa gerou um novo relatório dos pilares, em que é possível verificar todos os esforços utilizados no dimensionamento, a Figura 42 mostra os maiores valores de esforço normal solicitante para cada um dos pilares, no pavimento térreo, obtidos entre as diversas combinações de carregamento geradas pelo TQS. A cor do carregamento de cada pilar varia conforme a magnitude do esforço normal atuante, em que verde indica os menores carregamentos, e vermelho os maiores carregamentos.

Figura 42 – Esforços normais atuantes nos pilares do Exemplo 9.



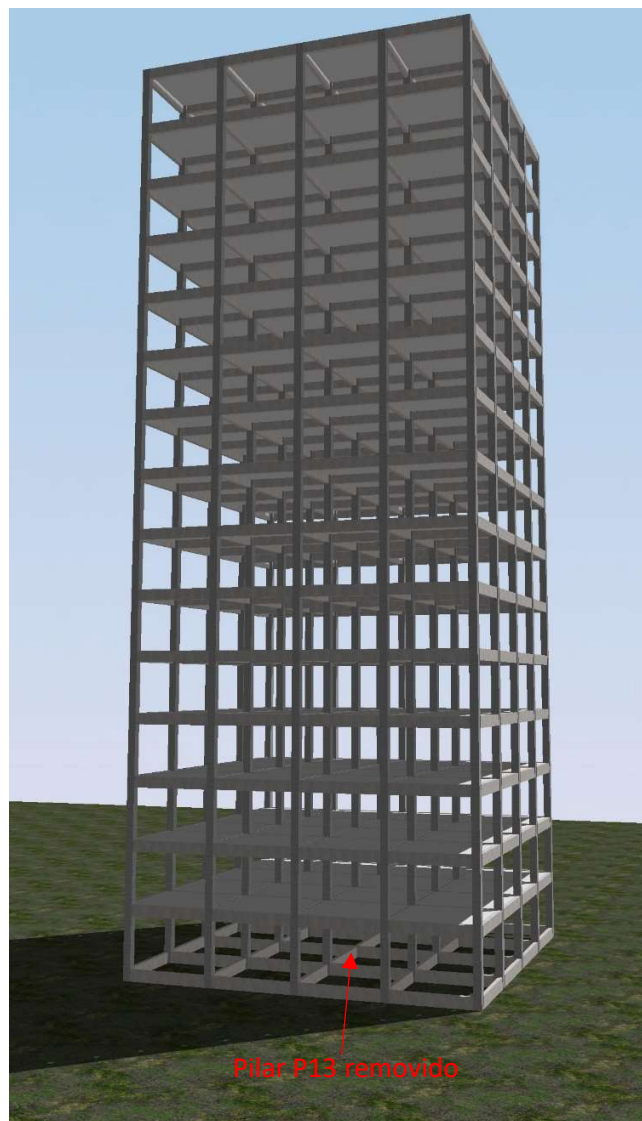
Fonte: Autora (2021).

Podemos observar que os pilares mais solicitados na estrutura são os pilares internos com esforços que variam entre 1443,53 kN e 1653,00 kN, seguidos dos pilares de extremidade com esforços que variam entre 1055,09 kN e 1214,25 kN e por fim os pilares de canto, que apresentam os menores esforços normais, que vão de 697,35 kN a 813,07 kN.

4.10 – EXEMPLO 10: EDIFÍCIO DE 15 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO PILAR P13

Para análise do Exemplo 10 foi utilizado o mesmo edifício apresentado no Exemplo 9, retirando-se pilar interno P13, conforme mostra a Figura 43.

Figura 43 – Visualização 3D do edifício com 15 pavimentos com a remoção do pilar P13.

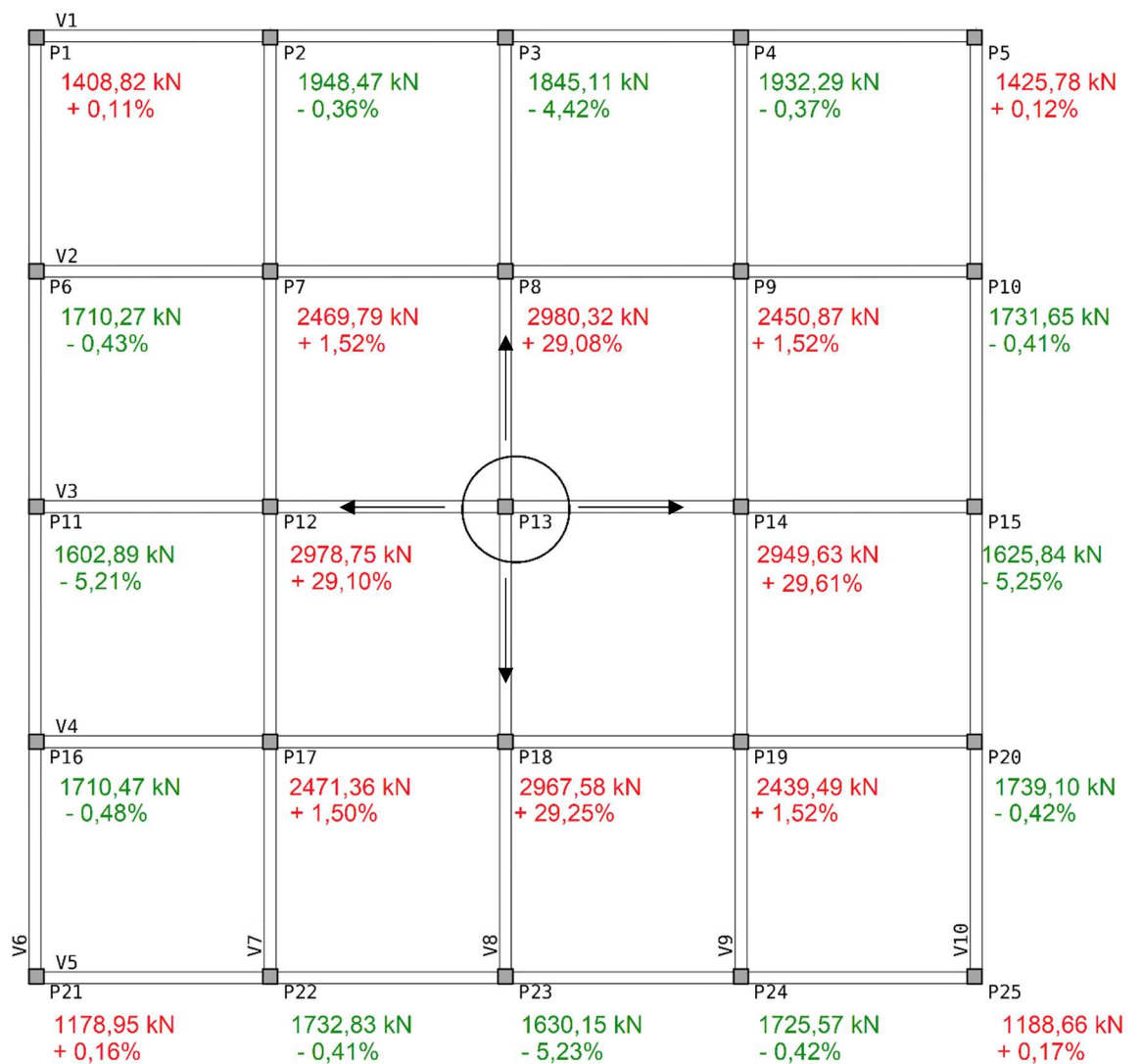


Fonte: Autora (2021).

4.10.1 – ANÁLISE DA REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS NORMAIS NOS PILARES

A Figura 44 apresenta os esforços normais atuantes nos pilares do pavimento térreo após a remoção do pilar P13, a imagem também mostra a porcentagem de variação desses carregamentos em comparação com o Exemplo 9. Os valores em vermelho, indicam um aumento no esforço normal, enquanto os valores em verde, indicam uma redução nesse carregamento.

Figura 44 – Carregamentos de esforço normal nos pilares do Exemplo 10, e sua respectiva variação em comparação com o exemplo 9.



Fonte: Autora (2021).

Os esforços normais atuantes nos pilares, antes e após a remoção do pilar P13 também são mostrados na Tabela 10, que faz uma comparação entre os exemplos 9 e 10, mostrando a porcentagem de variação entre os dois casos.

Tabela 10 – Comparação dos resultados do Exemplo 9 e Exemplo 10.

Pilar	Exemplo 9	Exemplo 10	Variação de carga (%)
P1	1407,25	1408,82	0,11
P2	1955,53	1948,47	-0,36
P3	1930,43	1845,11	-4,42
P4	1939,55	1932,29	-0,37
P5	1424,02	1425,78	0,12
P6	1717,63	1710,27	-0,43
P7	2432,92	2469,79	1,52
P8	2308,87	2980,32	29,08
P9	2414,09	2450,87	1,52
P10	1738,81	1731,65	-0,41
P11	1690,95	1602,89	-5,21
P12	2307,30	2978,75	29,10
P13	2236,49	-	-
P14	2275,82	2949,63	29,61
P15	1715,96	1625,84	-5,25
P16	1718,80	1710,47	-0,48
P17	2434,78	2471,36	1,50
P18	2295,92	2967,58	29,25
P19	2403,01	2439,49	1,52
P20	1746,36	1739,10	-0,42
P21	1177,09	1178,95	0,16
P22	1739,99	1732,83	-0,41
P23	1720,18	1630,15	-5,23
P24	1732,83	1725,57	-0,42
P25	1186,70	1188,66	0,17

Fonte: Autora (2021).

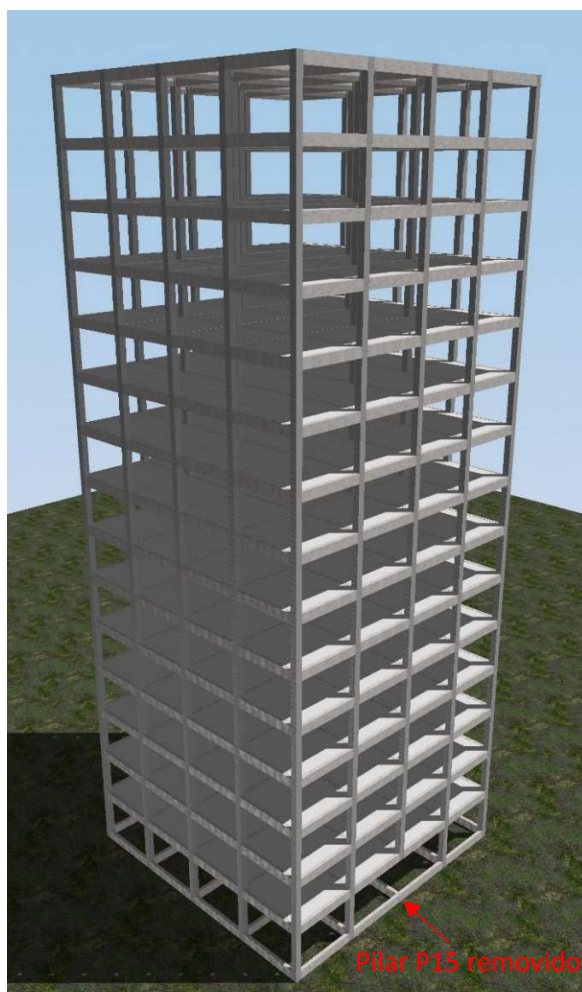
Com base nos resultados exibidos na Figura 44 e na Tabela 10, podemos observar que com a remoção do pilar P13, os pilares adjacentes ao elemento suprimido apresentaram os maiores aumentos de carga, que são os pilares P8, P12,

P14 e P18, que tiveram seus esforços normais solicitantes ampliados em 29,08%, 29,10%, 29,61% e 29,25%, respectivamente. Os pilares vizinhos P7, P9, P17 e P19 sofreram pequenos acréscimos de carga, inferiores a 2%. Já os pilares P3, P11, P23 e P15 apresentaram diminuição de 4,42%, 5,21%, 5,25% e 5,23%, respectivamente, em seus esforços normais solicitantes. Nos demais pilares, foram observadas porcentagens de variação pouco significantes nos carregamentos, inferiores a 0,5%.

4.11 – EXEMPLO 11: EDIFÍCIO DE 15 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO PILAR P15

Para a realização desse exemplo, foi retirado o pilar de extremidade P15 do edifício de 15 pavimentos apresentado no Exemplo 9. A visualização 3D do edifício no TQS com a remoção do pilar P15 é exibida na Figura 45.

Figura 45 – Visualização 3D do edifício de 15 pavimentos com remoção do pilar P15.

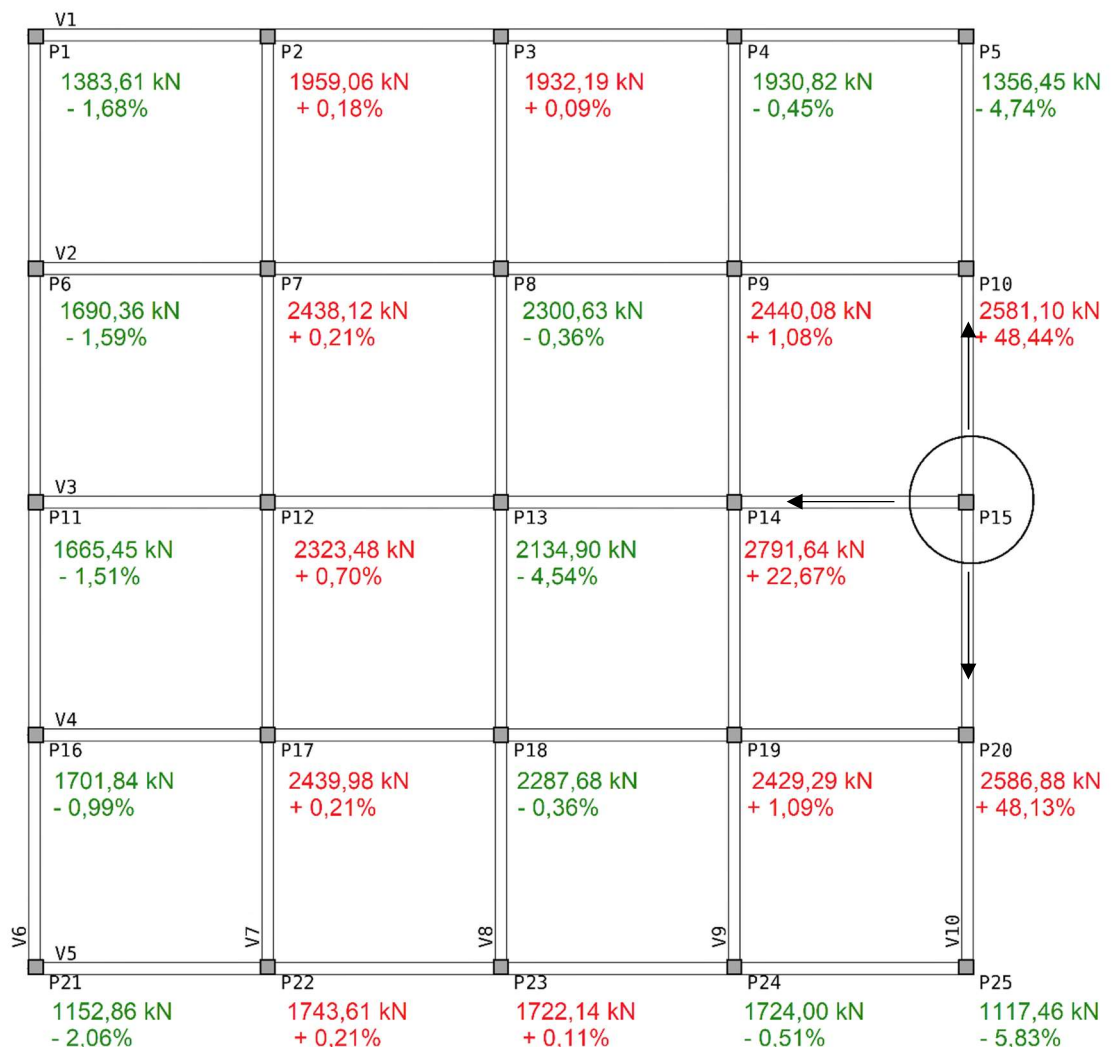


Fonte: Autora (2021).

4.11.1 – ANÁLISE DA REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS NORMAIS NOS PILARES

Com a remoção do pilar P15, foram analisados os novos esforços normais atuantes nos pilares do pavimento térreo, esses valores são apresentados na Figura 46, assim como a porcentagem de variação desses carregamentos em comparação com a situação original do edifício sem supressão de elementos estruturais.

Figura 46 – Carregamentos de esforço normal atuante nos pilares do Exemplo 11, e suas respectivas variações em comparação com o Exemplo 9.



Fonte: Autora (2021).

A Tabela 11 faz uma comparação dos valores de esforço normal em cada pilar obtidos no Exemplo 9 e Exemplo 11.

Tabela 11 – Comparação dos resultados do Exemplo 9 e Exemplo 11.

Pilar	Exemplo 9	Exemplo 11	Variação de carga (%)
P1	1407,25	1383,61	-1,68
P2	1955,53	1959,06	0,18
P3	1930,43	1932,19	0,09
P4	1939,55	1930,82	-0,45
P5	1424,02	1356,45	-4,74
P6	1717,63	1690,36	-1,59
P7	2432,92	2438,12	0,21
P8	2308,87	2300,63	-0,36
P9	2414,09	2440,08	1,08
P10	1738,81	2581,10	48,44
P11	1690,95	1665,45	-1,51
P12	2307,30	2323,48	0,70
P13	2236,49	2134,90	-4,54
P14	2275,82	2791,64	22,67
P15	1715,96	-	-
P16	1718,80	1701,84	-0,99
P17	2434,78	2439,98	0,21
P18	2295,92	2287,68	-0,36
P19	2403,01	2429,29	1,09
P20	1746,36	2586,88	48,13
P21	1177,09	1152,86	-2,06
P22	1739,99	1743,61	0,21
P23	1720,18	1722,14	0,11
P24	1732,83	1724,00	-0,51
P25	1186,70	1117,46	-5,83

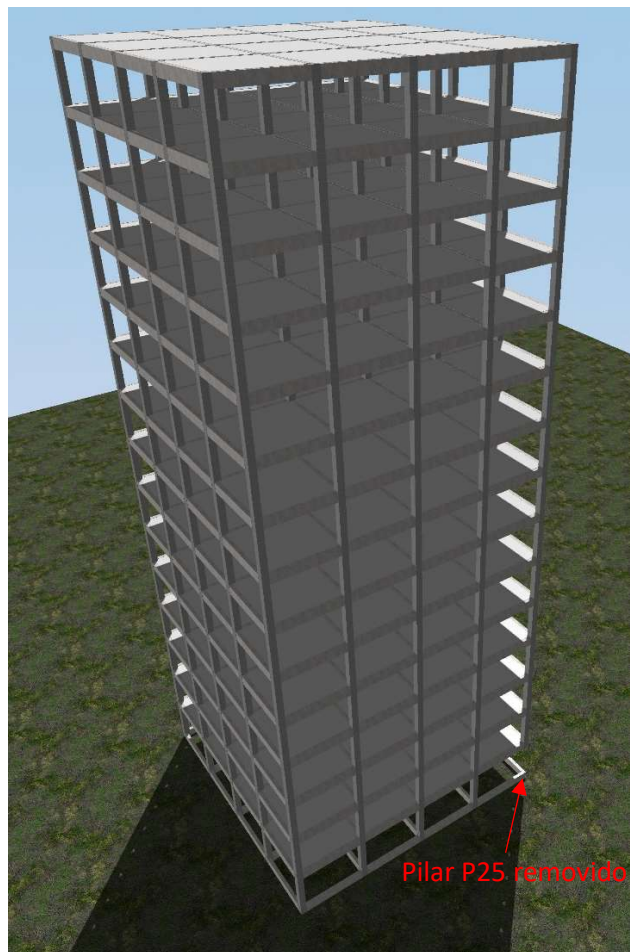
Fonte: Autora (2021).

A partir dos dados da Figura 46 e da Tabela 11, nota-se mais uma vez que os pilares que apresentaram maiores aumentos de carga foram os pilares adjacentes ligados diretamente ao pilar removido, nesse caso os pilares P10, P14 e P20, com acréscimos de 48,44%, 22,67% e 48,13%, respectivamente. Já os pilares P5, P13 e P25 apresentaram as maiores reduções de esforço normal, com média de 5,03%. Os demais pilares apresentaram pequenas variações, inferiores a 2,10% de redução ou aumento de carregamento.

4.12 – EXEMPLO 12: EDIFÍCIO DE 15 PAVIMENTOS COM REMOÇÃO DO PILAR P25

Para análise do Exemplo 12, será utilizado o mesmo modelo estrutural do Exemplo 9, mas dessa vez com a remoção do pilar de canto P25, como é mostrado na Figura 47.

Figura 47 – Visualização 3D do edifício de 15 pavimentos com remoção do pilar P25.

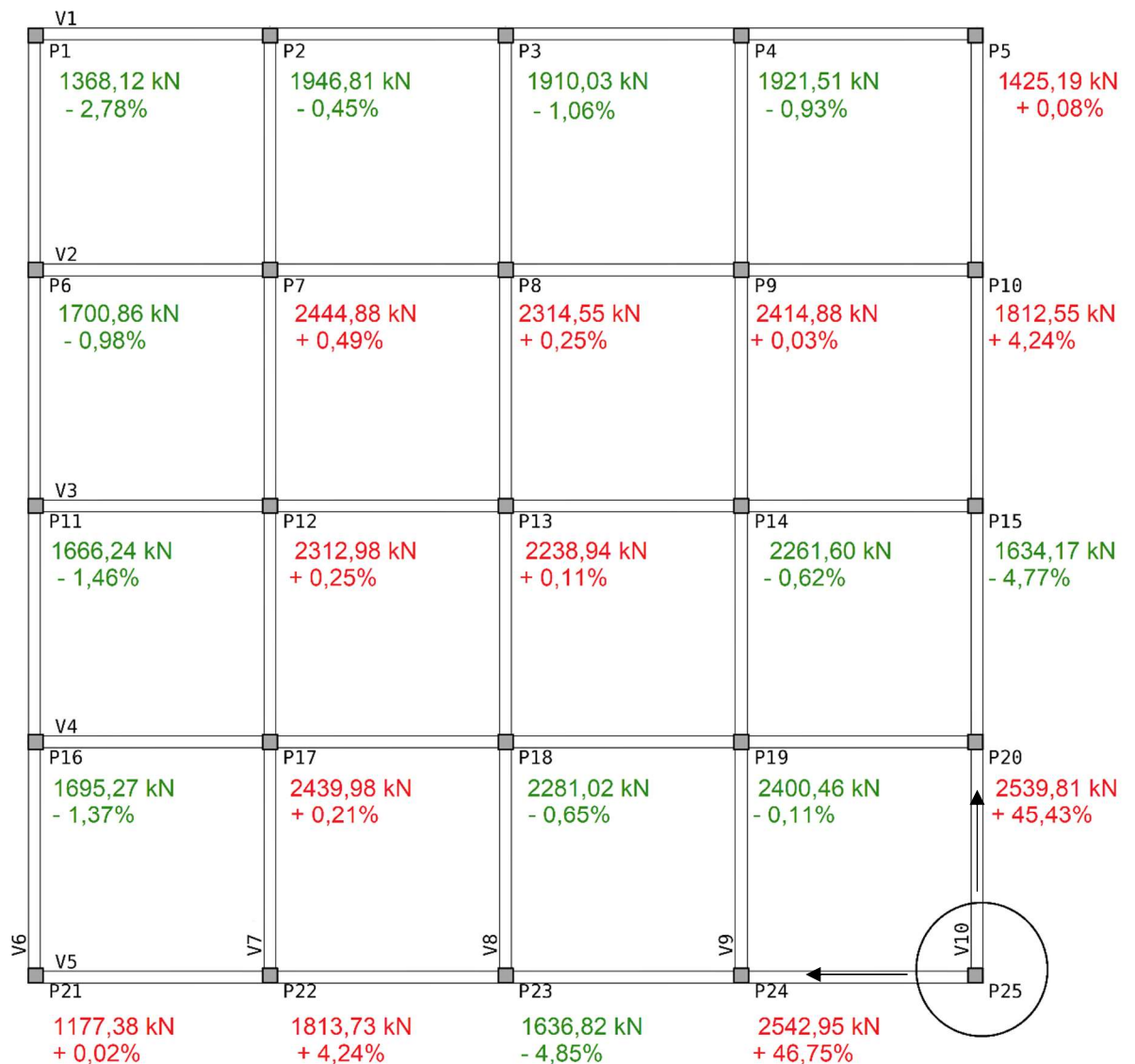


Fonte: Autora (2021).

4.12.1 – ANÁLISE DA REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS NORMAIS NOS PILARES

Gerado o novo edifício sem o pilar P25, no software TQS, foram levantados os valores de esforços normais atuantes nos pilares do pavimento térreo, a Figura 48 mostra esses valores, com sua respectiva variação em comparação com o edifício em situação original do Exemplo 9.

Figura 48 – Carregamentos de esforço normal nos pilares após a remoção do pilar P25, e suas respectivas variações em comparação com o Exemplo 9.



Fonte: Autora (2021).

A Tabela 12 traz uma comparação dos esforços normais antes e após a remoção do pilar P25.

Tabela 12 – Comparação dos resultados do Exemplo 9 e Exemplo 12.

Pilar	Exemplo 9	Exemplo 12	Variação de carga (%)
P1	1407,25	1368,12	-2,78
P2	1955,53	1946,81	-0,45
P3	1930,43	1910,03	-1,06
P4	1939,55	1921,51	-0,93
P5	1424,02	1425,19	0,08
P6	1717,63	1700,86	-0,98
P7	2432,92	2444,88	0,49
P8	2308,87	2314,55	0,25
P9	2414,09	2414,88	0,03
P10	1738,81	1812,55	4,24
P11	1690,95	1666,24	-1,46
P12	2307,30	2312,98	0,25
P13	2236,49	2238,94	0,11
P14	2275,82	2261,60	-0,62
P15	1715,96	1634,17	-4,77
P16	1718,80	1695,27	-1,37
P17	2434,78	2439,98	0,21
P18	2295,92	2281,02	-0,65
P19	2403,01	2400,46	-0,11
P20	1746,36	2539,81	45,43
P21	1177,09	1177,38	0,02
P22	1739,99	1813,73	4,24
P23	1720,18	1636,82	-4,85
P24	1732,83	2542,95	46,75
P25	1186,70	-	-

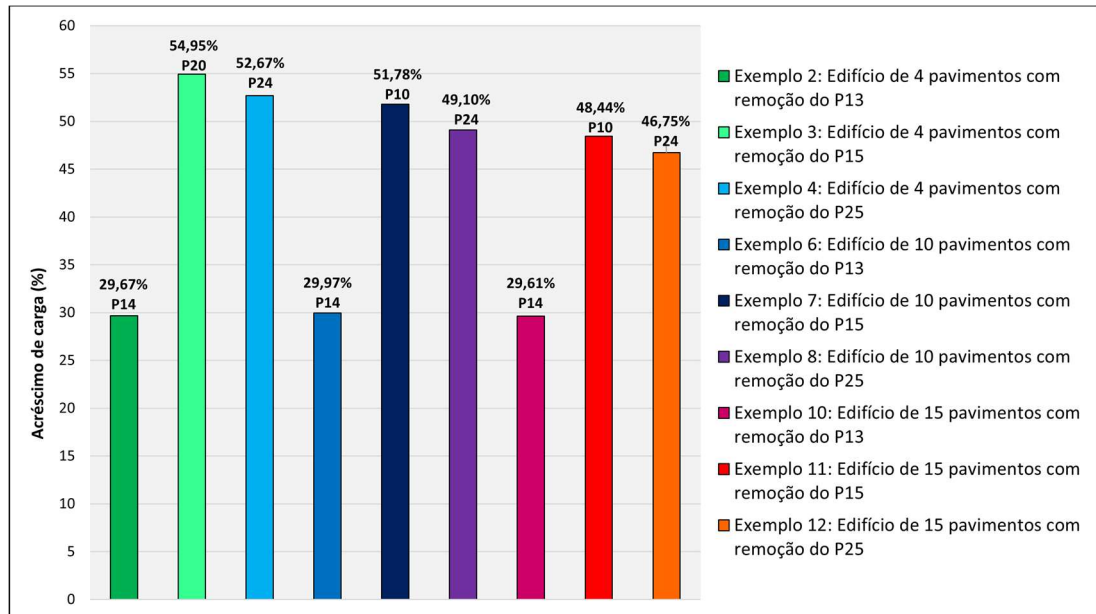
Fonte: Autora (2021).

Com base nos resultados demonstrados na Figura 48 e na Tabela 12 nota-se que, mais uma vez, a redistribuição de esforços em uma estrutura que perde um apoio acontece de forma preponderante aos elementos adjacentes ligados diretamente por vigas ao elemento estrutural retirado, que nesse caso são os pilares P20 e P24 que apresentaram acréscimos de 45,43% e 46,75% respectivamente. Os outros pilares tiveram variações inferiores a 5,00% de aumento ou redução em seus carregamentos de esforço normal.

4.13 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

O gráfico (Figura 49) relaciona os exemplos de remoção de pilares, comparando os maiores acréscimos de carga obtidos em cada caso.

Figura 49 – Comparação dos acréscimos de carga em cada exemplo.



Fonte: Autora (2021).

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve dois objetivos principais, o primeiro foi realizar um breve estudo apresentando o tema colapso progressivo. E o segundo foi analisar a redistribuição de esforços verticais em edifícios fictícios de concreto armado, elaborados com auxílio do software TQS seguindo as prescrições da NBR 6118 (2014), diante da possibilidade de colapso progressivo através da remoção de pilares.

Foi realizado o estudo de três modelos de edifício, o primeiro com 4 pavimentos, o segundo com 10 pavimentos e o último com 15 pavimentos, em cada um desses foi realizada a remoção de pilares no pavimento térreo para analisar o comportamento da estrutura diante à supressão de elementos de apoio.

Em todos os casos de retirada de pilares, o padrão de redistribuição de esforços se repetiu, ocorrendo de forma preponderante aos elementos estruturais adjacentes ligados diretamente por vigas ao pilar removido. Os elementos adjacentes absorveram a maior parte dos esforços normais que antes atuavam no pilar retirado, enquanto os outros pilares do pavimento tiveram pequenos acréscimos de carga. Por outro lado, alguns pilares, que se localizavam logo após os adjacentes no mesmo alinhamento do pilar removido, apresentaram uma redução em seus esforços normais, como no Exemplo 4, em que após a remoção do P25, o pilar P23 teve uma redução de 19,98% em seu carregamento.

Os aumentos de carga atingiram seus maiores valores nos casos de retirada dos pilares de extremidade e de canto, que foram realizadas nos exemplos 3, 4, 7, 8, 11 e 12. Nesses exemplos, os incrementos de carga nos pilares adjacentes foram superiores a 40%, que é o valor normalmente utilizado como fator de segurança na majoração de ações no dimensionamento de estruturas, sendo o maior aumento observado no Exemplo 3, de 54,95% no pilar P20 após a retirada do P15.

Em relação a quantidade de pavimentos dos edifícios, foi observado que quanto mais alto, maiores são as solicitações de esforços normais nos pilares, porém a altura do edifício não causou efeito na redistribuição de esforços, em todos os casos o padrão de redistribuição se repetiu independentemente da quantidade de pavimentos da edificação.

Neste trabalho nenhum elemento estrutural foi avaliado quanto a capacidade de resistir a redistribuição de esforços calculada. Para que fosse verificado se os pilares remanescentes suportariam as variações de ações observadas nesse trabalho

em uma situação real de perda de elementos de apoio, seria necessária a realização de um estudo sem a utilização de coeficientes de segurança na majoração de ações, ficando esse estudo como uma sugestão de pesquisa para trabalhos futuros relacionados ao tema.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118** - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9062** - Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2017.

CARRIÇO, Ernesto. No Rio, desabamento de três prédios em 2012 ainda não tem culpados. **Folha de S. Paulo**, São Paulo, 01 mai. 2018. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2018/05/no-rio-desabamento-de-tres-predios-em-2012-ainda-nao-tem-culpados.shtml>. Acesso em: 09 set. 2020.

COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS. **Ruína do Edifício Liberdade** – Cinêlandia. Ibape/SC. Santa Catarina, 2013.

EUROPEAN STANDARD. **EN 1992-1-7 Eurocode 1** - Actions on structures - Part 1-7: General actions - Accidental actions. Brussels, Belgium, 2006.

KIAKOJOURI, F.; BIAGI, V.; CHIAIA, B.; SHEIDAIL, M. R.; **Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects**. Elsevier, 2020. Disponível em: <http://www.elsevier.com/locate/engstruct>. Acesso em: 28 maio 2020.

KOZLOVA, Polina. **The phenomenom of progressive collapse according to russian norms**. 2013. 92 f. Bachelor's thesis (Degree in Civil and Construction Engineering) - Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta.

LARANJEIRAS, Antônio Carlos Reis. **Colapso Progressivo dos Edifícios: Breve Introdução**. Atualizado em: ago. 2011. Disponível em: http://download.tqs.com.br:8080/download/JornalTQS33_ArtigoAntonioCarlosRLaranjeiras.pdf. Acesso em: 20 fev. 2020.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **NISTIR 7396**: Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. USA, U. S. Departament Of Commerce, 2007.

OLIVEIRA, T. R. N.; MEDEIROS, K. A. S.; PALHARES, R. A.; REIS, M. N. **Análise da redistribuição de esforços verticais em edifício de concreto armado frente a ameaça do colapso progressivo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 60., 2018, Foz do Iguaçu. Anais [...]. Foz do Iguaçu: Ibracon, 2018. p. 1 – 12

PEREIRA, Rodrigo Costa. **Análise de um edifício de concreto armado considerando o colapso progressivo**. 2015. 80 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

PIVA, J. D.; GOMES, L.; ALECRIM, M.; AQUINO, W. O preço da imprudência. **Istoé**, São Paulo, 21 jan. 2016. Disponível em: https://istoe.com.br/188471_O+PRECO+DA+IMPRUDENCIA/. Acesso em: 24 fev. 2021.

PORTO, A. Laudo aponta falha em estrutura de obra na zona leste de São Paulo. **Metro World News**, 2013. Disponível em: <https://www.metroworldnews.com.br/foco/2014/02/12/laudo-aponta-falha-em-estrutura-obra-na-zona-leste-sao-paulo.html>. Acesso em 25 fev. 2021.

RONAN point. In: **Wikipédia**: a enciclopédia livre. Disponível em: https://es.wikipedia.org/wiki/Ronan_Point. Acesso em: 24 fev. 2021.

SAMPAIO, C. A. R. Em Belém, edifício cai e mata operários. **O expresso**, Bahia, 29 jan. 2011. Disponível em: <https://jornaloexpresso.wordpress.com/2011/01/29/predio-tomba-inteiro-na-china-em-belem-outro-espigao-cai-e-mata-operarios/>. Acesso em: 25 fev. 2021.

SESSA, Thiago da Cruz. **Colapso progressivo de edificações de concreto armado em construção**. 2017. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SLAGA, Lukasz. **Catenary action in precast skeleton structure – protection against progressive collapse**. Research Gate. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Ronan-Point-apartment-building-progressive-collapse-16-th-may-1968_fig1_280011504. Acesso em: 09 set. 2020.

STAROSSEK, Uwe. **Topology of progressive collapse**. Hamburg University of Technology. Alemanha, 2007.