



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Renata Reinehr

**ANÁLISE DAS SEQUÊNCIAS DE CONSTRUÇÃO EM
EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS EM CONCRETO
ARMADO**

Passo Fundo

2018

Renata Reinehr

ANÁLISE DAS SEQUÊNCIAS DE CONSTRUÇÃO EM
EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS EM CONCRETO
ARMADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Moacir Kripka.

Passo Fundo

2018

Renata Reinehr

A Comissão Examinadora abaixo aprova a dissertação de mestrado intitulada “Análise das sequências de construção em edifícios de múltiplos pavimentos em concreto armado”, elaborada por Renata Reinehr, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Data da aprovação: 12 de abril de 2018

Membros componentes da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Moacir Kripka
Universidade de Passo Fundo – UPF
Orientador

Prof. Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia
Universidade de Passo Fundo – UPF

Prof. Dr. Antônio Thomé
Universidade de Passo Fundo – UPF

Prof. Dr. Gihad Mohamad
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Passo Fundo

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, sempre presente em todos os momentos de minha vida.

Ao meu namorado e companheiro Marlon Martins, pelo incentivo para seguir em frente nesta etapa.

Ao meu orientador, professor Moacir Kripka, que, além da excelente orientação na elaboração deste trabalho, partilhou comigo suas ideias, experiência e conhecimentos.

A todos os professores e funcionários do curso de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo, pela convivência e por todos os ensinamentos repassados ao longo desses últimos anos.

Aos demais professores da área de estruturas do curso de Engenharia Civil, em especial ao professor Zacarias Chamberlain, por toda sua colaboração durante a pesquisa.

Aos amigos da pós-graduação, pela amizade, pelo companheirismo, pelas trocas de experiências.

Aos alunos do curso de Engenharia Civil, André Pritsch, Gabriela Guarnieri, Pedro Henrique Trentin e Maiara Posse, por toda a ajuda prestada no estudo.

À TQS, por ter cedido a licença do *software* para as análises realizadas no trabalho, em especial, ao engenheiro Marcus Salina, por ter sanado todas as dúvidas referentes ao módulo efeito incremental.

Ao colega de profissão e amigo Fabiano Silva de Assis, por todo o auxílio na parte de medições em campo.

Aos topógrafos Jaime Nicoletti Antunes e Giordani Cé, que me acompanharam e auxiliaram durante todo o processo de medições.

À Construtora Una, especialmente ao engenheiro Rodrigo Medeiros e Souza, por ter autorizado o trabalho de medições em obra.

À Arte Estrutural Engenharia, em especial ao engenheiro Fernando Camargo, por ter fornecido as informações referentes ao projeto estrutural.

Ao professor Diogo Zanette e ao colega Edson Modelski, por toda a ajuda prestada com o *software* TQS.

Aos professores membros da banca examinadora deste trabalho, por todas as contribuições efetuadas.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a elaboração deste trabalho, meu sincero agradecimento.

RESUMO

A análise de edifícios é um tópico de grande importância para a Engenharia de Estruturas e requer do projetista um estudo criterioso. Métodos aproximados ainda são utilizados devido à sua simplicidade. Entretanto, diversos estudos na literatura mostram que a análise simplificada pode levar o projetista ao equívoco de utilizar um modelo estrutural inadequado, podendo, inclusive, deixar de considerar todos os carregamentos existentes. Torna-se necessário adotar um modelo de análise cada vez mais realista. Melhor precisão dos resultados pode ser obtida levando-se em conta que a estrutura não é construída e carregada de uma só vez. É importante acompanhar os esforços desenvolvidos na estrutura ao longo das etapas de construção e carregamento. Note-se que grande parte do carregamento já a solicita antes de ela estar pronta, além de carregamentos de montagem tais como: materiais estocados, entulhos, equipamentos, entre outros, que ocorrem apenas durante a construção. Com o intuito de verificar se podem existir divergências de resultado entre o modelo estrutural simulando a sequência construtiva (aqui denominado de modelo sequencial construtivo) e o modelo usualmente empregado no projeto estrutural que considera o edifício submetido às ações finais e com resistência do concreto aos 28 dias (denominado de modelo convencional), foram realizadas simulações numéricas para comparar os resultados de esforços, deslocamentos e dimensionamento pelos dois modelos. Foram variados alguns parâmetros que, direta ou indiretamente, poderiam interferir nos resultados, tais como: altura da edificação, geometria da edificação, resistência do concreto ao longo do tempo, cronograma construtivo e também as ações de efeito construtivo. Concomitantemente, foram realizadas medições de deslocamentos nas colunas de uma edificação real em concreto armado, para comparar os resultados obtidos pelas medições com os resultados numéricos do modelo sequencial construtivo dessa edificação. De maneira geral, foram encontradas diferenças significativas entre os dois modelos de cálculo, assim como importantes considerações foram obtidas a partir dos exemplos desenvolvidos, evidenciando que o modelo sequencial construtivo é o que mais se aproxima às reais condições a que as estruturas estão submetidas.

Palavras-chave: Análise sequencial construtiva. Concreto armado. Estruturas. Ações construtivas.

ABSTRACT

Buildings analysis is an important topic for Structural Engineering and requires a careful study by the designer. Approximate methods are still used because of their simplicity. However, several studies show that the simplified analysis can lead the designer to the mistake of using an inadequate structural model and may even neglect all existing loads. It is necessary to adopt an increasingly realistic analysis model. Better accuracy of results may be obtained by taking into account that the structure is not built and loaded at once. It is important to follow the developed stresses in the structure throughout the construction and loading stages. A large part of the load acts on the structure before it is ready, in addition to assembly loads such as: stocked materials, debris, equipment, among others, that are already there during construction. In order to verify if there may be differences of result between the structural model that simulates the constructive sequence (here called constructive sequential model) and the model usually employed in the structural design that considers the building submitted to the final actions and with concrete resistance at twenty-eight days (known as the conventional model), numerical simulations were performed to compare the results of stresses, displacements and sizing by the two models. Several parameters that directly or indirectly could interfere in the results were changed, such as: height of the building, geometry of the building, concrete resistance over time, constructive schedule and also the constructive effect actions. Simultaneously, displacements measures were made on the columns of a real building in reinforced concrete, to compare the results obtained by the measurements with the numerical results of the constructive sequential model of this building. In general, significant differences were found between the two calculation models, as well as important considerations were obtained from the examples developed, evidencing that the constructive sequential model is the closest to the real conditions to which the structures are submitted.

Keywords: Constructive Sequential Analysis. Reinforced Concrete. Structures. Constructive Actions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Edifício de três andares considerando-se a Análise Convencional.....	18
Figura 2 – Edifício de três andares considerando-se a Análise Sequencial Construtiva.....	19
Figura 3 – Esforços nas extremidades da viga devido ao deslocamento diferencial no apoio.	20
Figura 4 – Fluxograma das etapas para o desenvolvimento da pesquisa.	29
Figura 5 – Planta de formas.....	32
Figura 6 – Edifício de cinco pavimentos considerando-se a análise convencional.....	33
Figura 7 – Edifício de cinco pavimentos considerando-se a análise sequencial construtiva. ..	34
Figura 8 – Deslocamentos diferenciais verticais (P2-P5).....	36
Figura 9 – Momentos fletores (análise convencional <i>versus</i> análise sequencial construtiva)..	37
Figura 10 – Planta de formas do pavimento tipo.....	38
Figura 11 – Representação esquemática da estrutura e carregamento do modelo convencion	39
Figura 12 – Modelo convencional - representação tridimensional da estrutura.....	40
Figura 13 – Modelo sequencial construtivo - representação tridimensional das estruturas.	41
Figura 14 – Representação esquemática das estruturas e carregamentos do modelo sequencial construtivo.	42
Figura 15 – Análise sequencial construtiva (módulo efeito incremental – TQS).	44
Figura 16 – Definição das parcelas e etapas de carga (módulo efeito incremental – TQS).....	45
Figura 17 – Definição da variação do fck com o tempo (módulo efeito incremental – TQS). 46	
Figura 18 – Esquema do histórico de carregamento na estrutura (módulo efeito incremental – TQS).	47
Figura 19 – Pórtico espacial (combinação 9).	49
Figura 20 – Reações de apoio verticais nas fundações (em kN).	50
Figura 21 – Deslocamentos diferenciais verticais entre P2-P5 (em mm).....	51
Figura 22 – fck constante ao longo das etapas de construção (28 dias).	57
Figura 23 – fck variável ao longo das etapas de construção.	58
Figura 24 – Simulação dos dias que representam uma fase construtiva – ciclo de concretagem (3, 7 e 14).....	58
Figura 25 – Deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares 2 e 5 ao longo da altura da edificação.....	59
Figura 26 – Planta de formas da edificação.....	61

Figura 27 – Representação tridimensional da estrutura.....	61
Figura 28 – Momentos fletores na viga V9 (em kN.m) para os modelos de análise convencional e sequencial construtivo.	72
Figura 29 – Momentos fletores no pilar P3 (em kN.m) para os modelos de análise convencional e sequencial construtivo.	74
Figura 30 – Diagramas de envoltórias de momentos fletores para a viga V9 no 19º pavimento (em kN.m).....	75
Figura 31 – Detalhamento de armadura para a viga V9 no 19º pavimento pelo modelo convencional.....	76
Figura 32 – Detalhamento de armadura para a viga V9 no 19º pavimento pelo modelo sequencial construtivo.	77
Figura 33 – Planta de formas do pavimento tipo.....	84
Figura 34 – Vista isométrica da edificação.	85
Figura 35 – Diagramas de envoltórias de momentos fletores para a viga V29 no 19º pavimento (em kN.m).....	89
Figura 36 – Detalhamento de armadura para a viga V29 no 19º pavimento pelo modelo convencional.....	90
Figura 37 – Detalhamento de armadura para a viga V29 no 19º pavimento pelo modelo sequencial construtivo.	91
Figura 38 – Planta esquemática com a locação dos RNs.	93
Figura 39 – Locação do RN 1.....	94
Figura 40 – Nivelamento geométrico duplo.....	94
Figura 41 – Identificação dos pontos de controle no subsolo 1.	96
Figura 42 – Etapas das medições.....	97
Figura 43 – Poligonal planialtimétrica.	98
Figura 44 – Processo de medição para obtenção das cotas.	99
Figura 45 – Ilustração da posição do ponto de controle no subsolo 1.....	100
Figura 46 – Ilustração da posição do ponto de controle no pavimento condominial.	100
Figura 47 – Ilustração da posição do ponto de controle em todos os pavimentos.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Deslocamentos absolutos (em mm).....	35
Tabela 2 – Deslocamentos diferenciais (em mm).	35
Tabela 3 – Reações de apoio verticais nas fundações (em kN).....	50
Tabela 4 – Deslocamentos diferenciais verticais P2-P5 (em mm).	51
Tabela 5 – Esforços axiais no pilar P5 em kN (análise sequencial construtiva versus módulo efeito incremental).....	52
Tabela 6 – Esforços axiais no pilar P5 (em kN).	53
Tabela 7 – Esforços axiais no pilar P2 (em kN).	53
Tabela 8 – Momentos fletores negativos na viga V5 sobre o pilar P2 (em kN.m).....	54
Tabela 9 – Momentos fletores negativos na viga V5 sobre o pilar P5 (em kN.m).....	54
Tabela 10 – Momentos fletores positivos na V5 (em kN.m).....	55
Tabela 11 – Variação de β_1 com o tempo t em dias para diferentes tipos de cimento.....	56
Tabela 12 – Deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P5 e P2 (em mm).....	59
Tabela 13 – Momentos fletores negativos na viga V5 sobre o pilar P2 (em kN.m).....	60
Tabela 14 – Deslocamentos diferenciais verticais P3-P8 (em mm).	63
Tabela 15 – Momentos fletores na viga V9 sobre o pilar P8 no 1º pavimento.	64
Tabela 16 – Momentos fletores no topo do pilar P13 no 1º pavimento.	65
Tabela 17 – Deslocamentos diferenciais verticais entre P3-P8 (em mm).	69
Tabela 18 – Momentos fletores negativos na viga V9 sobre o pilar P3 (em kN.m).....	70
Tabela 19 – Momentos fletores negativos na viga V9 sobre o pilar P8 (em kN.m).....	70
Tabela 20 – Momentos fletores positivos no centro do vão (em kN.m).	71
Tabela 21 – Momentos fletores no pilar P3 - base (em kN.m).....	73
Tabela 22 – Momentos fletores no pilar P3 – topo (em kN.m).	73
Tabela 23 – Resumo do aço para a V9 no 19º pavimento.	78
Tabela 24 – Resumo do aço para o pilar P8 pelos dois modelos de análise.....	79
Tabela 25 – Momentos fletores negativos na viga V9 sobre o pilar central P8 (em kN.m)....	81
Tabela 26 – Momentos fletores negativos na viga V9 sobre o pilar central P8 (em kN.m)....	82
Tabela 27 – Momentos fletores no pilar P3 - topo (em kN.m).....	82
Tabela 28 – Deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P9-P14 (em mm).....	88
Tabela 29 – Classificação dos níveis.....	95
Tabela 30 – Verificação da precisão do nivelamento.....	96

Tabela 31 – Verificação da precisão do nivelamento trigonométrico.	99
Tabela 32 – Encurtamentos axiais absolutos de acordo com a sequência de construção (em mm).....	101
Tabela 33 – Encurtamentos axiais diferenciais (em mm).....	102
Tabela 34 – Recalques dos pilares P9 e P14 (em mm).....	102
Tabela 35 – Encurtamentos axiais absolutos (em mm).	104
Tabela 36 – Encurtamentos axiais diferenciais (em mm).....	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Síntese dos trabalhos descritos.	25
Quadro 2 – Síntese das cargas consideradas na literatura.	27
Quadro 3 – Resumo das etapas e carregamentos do modelo sequencial construtivo.....	43
Quadro 4 – Resumo das etapas e carregamentos do modelo sequencial construtivo.....	62
Quadro 5 – Seções dos pilares ao longo da altura da edificação.	66
Quadro 6 – Resumo dos esquemas e carregamentos do modelo sequencial construtivo.....	67
Quadro 7 – Análise sequencial construtiva - Cronograma construtivo 1.....	80
Quadro 8 – Análise sequencial construtiva – Cronograma construtivo 2.	80
Quadro 9 – Descrição dos pavimentos da edificação.	83
Quadro 10 – Resumo das estruturas e carregamentos do modelo sequencial construtivo.	86
Quadro 11 – Dimensões dos pilares P9 e P14.	92
Quadro 12 – Instrumentos utilizados no método de nivelamento geométrico.	95
Quadro 13 – Instrumentos utilizados pelo método de nivelamento trigonométrico.....	98
Quadro 14 – Resumo das estruturas e carregamentos do modelo sequencial construtivo da edificação.....	103

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Objetivos.....	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
1.3	Estrutura da dissertação	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Análise convencional <i>versus</i> análise sequencial construtiva.....	18
2.2	Estudos sobre análise da sequência construtiva em edifícios.....	20
2.3	Ações de efeito construtivo	25
2.4	Medições de encurtamentos axiais de colunas em edificações	27
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	29
4	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS – RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1	Estrutura 1	32
4.2	Estrutura 2	37
4.2.1	Características da estrutura analisada	37
4.2.2	Modelos e carregamentos	38
4.2.3	Considerações.....	48
4.2.4	Comparações realizadas e resultados obtidos.....	49
4.3	Estrutura 3	60
4.3.1	Características da estrutura analisada	60
4.3.2	Modelos e carregamentos	62
4.3.3	Considerações.....	63
4.3.4	Comparações realizadas e resultados obtidos.....	63
4.4	Estrutura 4	66
4.4.1	Características da estrutura analisada	66
4.4.2	Modelos e carregamentos	66
4.4.3	Considerações.....	68
4.4.4	Comparações realizadas e resultados obtidos.....	68
4.5	Estrutura 5	83
4.5.1	Características da estrutura analisada	83

4.5.2	Modelos e carregamentos	85
4.5.3	Considerações	86
4.5.4	Comparações realizadas e resultados obtidos.....	87
5	CONCLUSÕES.....	105
	REFERÊNCIAS	108

1 INTRODUÇÃO

A análise de edifícios é um tópico de grande importância para a Engenharia de Estruturas.

Uma vez escolhido o sistema estrutural, deve-se adotar um modelo estrutural capaz de representá-lo adequadamente e por meio do qual são calculados deslocamentos e esforços solicitantes (COELHO, 2003). Nesse contexto, Coelho (2003) comenta que uma melhor precisão dos resultados pode ser obtida levando-se em conta que a estrutura não é construída e carregada de uma só vez. É importante acompanhar os esforços desenvolvidos na estrutura ao longo das etapas de construção e carregamento, uma vez que grande parte do carregamento já a solicita antes de ela estar pronta.

Além das ações de peso próprio do concreto, das fôrmas, escoras e reescoras, que podem ser estimadas com razoável precisão, outras ações também atuam durante a construção. Essas ações são de difícil determinação e compreendem: peso dos trabalhadores, equipamentos, materiais, entulhos, impacto produzido pelo lançamento do concreto, vento, entre outras (PRADO, 1999).

A estrutura de um edifício de concreto armado é normalmente projetada para resistir apenas às ações atuantes finais, correspondentes à fase de ocupação do edifício e considerando-se a resistência do concreto aos 28 dias. Entretanto, durante as etapas construtivas, a composição das ações a que a estrutura está submetida é bem diferente daquela prevista no projeto convencional (FREITAS, 2004).

Percebe-se que a ABNT NBR 6118 (2014) expressa preocupação com os efeitos das ações que atuam durante a construção, mas não indica nenhum procedimento para que a avaliação desses efeitos possa ser feita. De acordo com a norma supracitada, as estruturas em que todas as fases construtivas não tenham sua segurança garantida pela verificação da obra pronta devem ter incluídas no projeto as verificações das fases construtivas mais significativas e sua influência na fase final. A verificação de cada uma dessas fases deve ser feita considerando a parte da estrutura já executada e as estruturas provisórias auxiliares com seus respectivos pesos próprios. Além disso, devem ser consideradas as cargas acidentais de execução.

Segundo Wilson et al. (1992), o efeito da aplicação sequencial de cargas em função da natureza sequencial de construção é um fator importante a ser considerado na análise de edifícios de múltiplos pavimentos. Esse efeito tem sido ignorado por muitos engenheiros e uma

das maneiras de inclui-lo na análise é realizá-la por meio de procedimentos passo a passo, de acordo com a aplicação sequencial de cargas conforme a construção avança.

Além da diminuição do ciclo de construção utilizado para a execução de pavimentos de concreto armado, escoras, reescoras e lajes de concreto são muitas vezes solicitados com carregamentos de construção além dos previstos em projeto. Dessa maneira, observa-se que a consideração das ações de construção é de suma importância para a garantia de segurança de uma obra (FREITAS, 2004).

Na análise convencional, parte-se do princípio de que todos os carregamentos são aplicados simultaneamente na estrutura pronta e que a estrutura global é toda construída de uma só vez, o que certamente não condiz com a realidade, uma vez que a edificação chega ao seu término após passar por diversas etapas sucessivas de construção e de carregamento (GORZA, 2000).

A grande maioria dos programas ditos comerciais não considera esse tipo de análise, correndo o risco de não apresentar, aos usuários, os esforços nos elementos durante a construção, que podem chegar a valores maiores do que aqueles calculados para o seu uso final e até colocar a estrutura em risco devido ao subdimensionamento (GORZA, 2000).

A maioria desses programas tem sido usados considerando a estrutura totalmente construída e com todo o carregamento atuando simultaneamente. A princípio, essa hipótese é válida para ações horizontais e para ações verticais aplicadas à estrutura já concluída. Mas, para ações tais como peso próprio de alvenarias, pisos e revestimentos, que são impostas gradualmente e que dependem de um cronograma da obra, é conveniente que se considere a sequência construtiva da edificação (SILVA, 2006).

A distribuição correta dos deslocamentos e tensões de qualquer membro pode ser obtida acumulando-se os resultados da análise de cada fase. Ignorando esse efeito, pode-se chegar a uma análise incorreta dos resultados, especialmente nos andares superiores do edifício (KWAK; KIM, 2006).

1.1 Justificativa

No caso de edifícios de vários andares, a importância da análise das etapas de construção e carregamento pode ser compreendida a partir do seguinte fato: a suposição de que todas as cargas são aplicadas ao mesmo tempo não é válida em uma sequência real de construção porque

um edifício é construído andar por andar e a carga permanente atua sequencialmente (DUBEY, 2015).

As ações que atuam nos pavimentos durante a construção podem ultrapassar as ações em serviço consideradas no projeto. Além disso, as ações de construção normalmente solicitam o concreto antes que este tenha atingido as características de resistência e deformabilidade previstas, aos 28 dias. A preocupação com esse carregamento prematuro se torna cada vez maior na medida em que, nos últimos anos, tem-se assistido a uma tendência de aceleração do processo de construção dos edifícios em concreto armado (PRADO, 1999).

De acordo com Carvalho (1997), durante o período de tempo de vida da estrutura, as cargas podem ser bem diferentes das cargas de serviço típicas, e pode ocorrer que seus efeitos sejam especialmente críticos para a ruína da estrutura.

As normas nacionais não indicam um procedimento para avaliação dos efeitos que ocorrem durante a fase construtiva. Sabe-se, porém, que as ações atuantes na fase construtiva podem produzir danos prematuros, como fissuração e perda de rigidez da estrutura, que irão aumentar as deformações, tanto as imediatas quanto as diferidas no tempo (NEGREIROS, 2010).

As deformações excessivas causadas pelo carregamento precoce trazem reflexos negativos não só com relação ao comportamento mecânico da estrutura, pois afetam diretamente a capacidade resistente do concreto (FREITAS, 2004).

Epaarachchi et al. (2002) verificaram que, se o processo de concepção de uma estrutura ignora o carregamento de construção durante a fase construtiva, uma redução de segurança estrutural pode ocorrer.

Hadipriono e Wang (1986) estudaram os colapsos de 85 cimbramentos utilizados para estruturas de concreto. O sistema de escoramento deficiente foi a principal causa desses colapsos. Os mesmos autores identificaram também as etapas construtivas em que ocorreram os colapsos, constatando que as etapas de lançamento de concreto nas formas são as situações críticas, sendo responsáveis por praticamente metade dos colapsos.

Eldukair e Ayyub (1991) realizaram um estudo a respeito de colapsos em estruturas e verificaram que uma porcentagem significativa desses colapsos ocorre na fase de construção do edifício.

Diferentes casos de desabamento durante o processo construtivo ocorreram no Brasil. Em 2009, ocorreu o desabamento da laje de ampliação do shopping SP Market em São Paulo (SP). Segundo reportagem do jornal O globo (2009), no momento em que a laje desabou, havia sido despejada na forma, por um caminhão, a 25ª carga de concreto.

Outro desabamento ocorreu em Vitória (ES). O acidente ocorreu quando os operários concretavam o terceiro pavimento do edifício no bairro Jardim Camburi (GAZETA ONLINE, 2009).

Em 2013, também no estado de São Paulo, ocorreu o desabamento de uma laje na zona leste da capital, no bairro São Mateus. Segundo a reportagem, o acidente causou ainda mais estranheza em razão de o desabamento ter ocorrido ainda durante o processo de construção da obra, quando a carga total sobre a estrutura não era a de 100% prevista em projeto (R7, 2013).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar a importância da consideração das sequências de construção na análise de edifícios de múltiplos pavimentos em concreto armado.

1.2.2 Objetivos específicos

Para o alcance do objetivo geral, alguns objetivos específicos foram definidos:

- a) Analisar a diferença dos processos de análise convencional e sequencial construtivo.
- b) Comparar os deslocamentos e os esforços nos elementos estruturais de edifícios em concreto armado pela análise sequencial construtiva e pela análise convencional.
- c) Monitorar os encurtamentos axiais de pilares de uma edificação real durante as várias fases de construção visando compará-los com o modelo numérico sequencial construtivo dessa edificação.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente trabalho se encontra dividido em cinco capítulos, conforme segue:

Neste primeiro capítulo, são apresentadas algumas considerações sobre a temática do trabalho, bem como a justificativa e os objetivos.

A revisão bibliográfica é apresentada no segundo capítulo, no qual é desenvolvida a fundamentação teórica e são apresentados os conceitos básicos necessários para o entendimento

do trabalho. A revisão bibliográfica foi dividida em quatro partes. Na primeira, são apresentadas as diferenças entre a análise convencional e a análise sequencial construtiva. Na segunda, são descritos estudos sobre análise da sequência construtiva em edifícios, mostrando sobretudo a evolução do assunto nos últimos anos. Na terceira, são enfocadas as ações de efeito construtivo e evidenciados valores fornecidos por normas e apontados por autores em suas pesquisas. E, na quarta parte, foram abordadas medições de encurtamentos axiais de colunas em edificações, comentando algumas técnicas que já foram utilizadas em pesquisas.

No terceiro capítulo, são descritos os procedimentos metodológicos gerais para o desenvolvimento da pesquisa. Já no quarto capítulo, são apresentados os exemplos analisados e os respectivos resultados, bem como as discussões que ampararam esse processo. Foram estudadas cinco estruturas, assim: um pórtico plano, três estruturas fictícias (de 5, 12 e 20 pavimentos) e uma edificação real de 19 pavimentos.

Finalmente, no quinto capítulo, relacionam-se as conclusões obtidas com o desenvolvimento desta dissertação e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

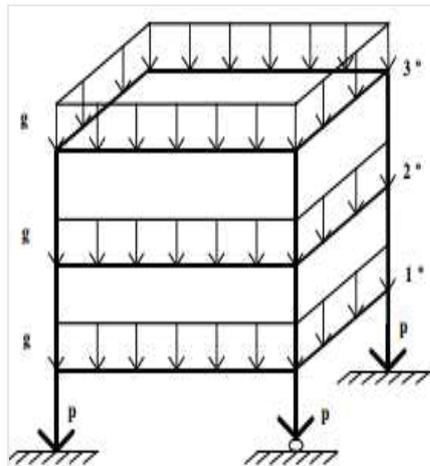
Nesta seção, são abordados os itens principais para o desenvolvimento deste trabalho, sendo estes: análise convencional *versus* análise sequencial construtiva, estudos sobre análise da sequência construtiva em edifícios, ações de efeito construtivo e medições de encurtamentos axiais de colunas em edificações. Além disso, para uma abordagem mais ampla e uma compreensão mais criteriosa sobre o assunto, alguns itens foram subdivididos em seções específicas.

2.1 Análise convencional *versus* análise sequencial construtiva

Imaginando a sequência construtiva, quando apenas o primeiro pavimento está concluído, seu peso próprio não causa esforços solicitantes nos demais pavimentos que ainda nem estão construídos. Na análise do pórtico completo (análise convencional), esse carregamento influenciaria todos os elementos, provocando esforços em peças inexistentes quando da aplicação da carga (JUNIOR, 1998).

Na análise convencional, assume-se que as cargas são aplicadas ao mesmo tempo, após a estrutura estar concluída, conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Edifício de três andares considerando-se a Análise Convencional.

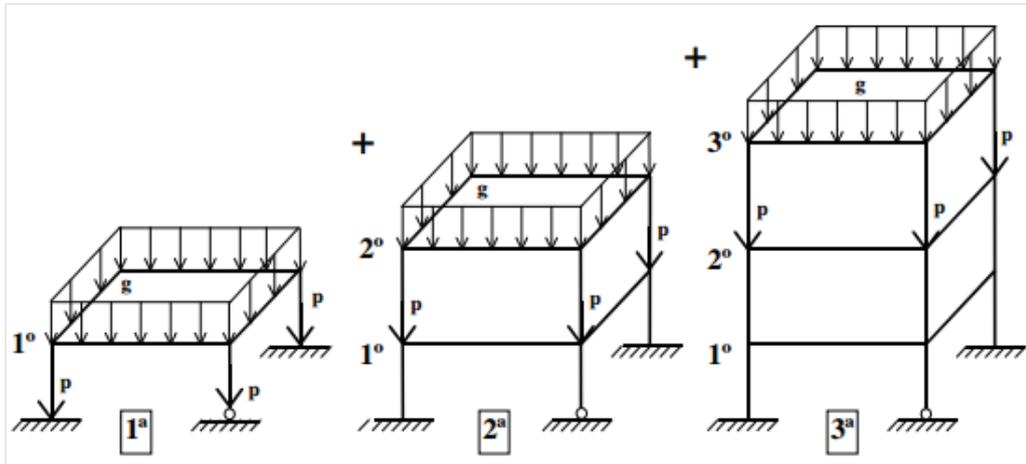


Fonte: GORZA, 2000.

Enquanto que, na análise sequencial construtiva a estrutura é carregada na medida em que é construída (Figura 2). Dessa forma, os esforços nos elementos se alteram

progressivamente ao longo do período de construção. Para encontrar os esforços finais, basta que se faça a superposição dos esforços obtidos em cada etapa.

Figura 2 – Edifício de três andares considerando-se a Análise Sequencial Construtiva.



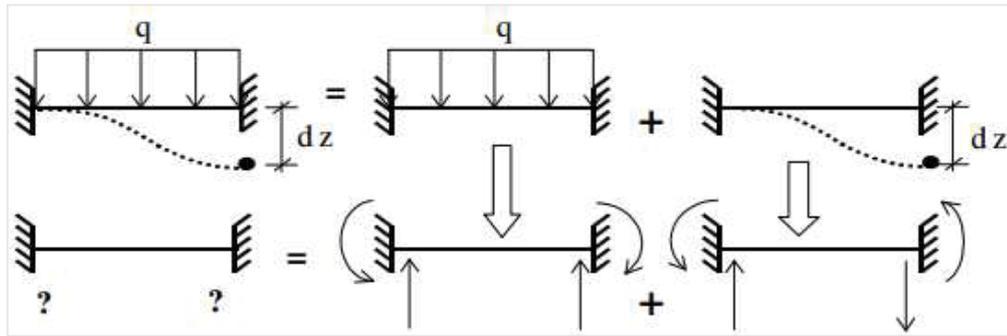
Fonte: GORZA, 2000.

Conforme Kripka (1990), a análise convencional acumula os deslocamentos dos nós da estrutura em relação a um referencial global fixo e, portanto, calcula seus deslocamentos desde a posição no espaço inicialmente prevista para sua construção até a posição final, já com a estrutura totalmente construída. Observa-se que, dessa forma, estão sendo erroneamente computados em alguns andares deslocamentos que não são responsáveis por quaisquer deformações nesses andares. Já na análise sequencial construtiva, o sistema de referência é variável, só havendo deslocamento de um andar após este ter sido construído.

Outro fato importante a ser considerado na análise sequencial construtiva é a diferença nos esforços cortantes e de flexão finais das vigas devidos à existência dos deslocamentos axiais diferenciais entre pilares adjacentes, já que alguns deles absorvem maior esforço axial em relação a outros. Nos últimos andares dos edifícios, a necessidade da consideração da análise sequencial construtiva fica mais evidente para o cálculo dos deslocamentos e esforços nas vigas, uma vez que, se forem consideradas as etapas construtivas, os deslocamentos nos apoios das vigas serão menores, provenientes apenas da montagem dos últimos andares e não do cálculo do edifício como um todo (GORZA, 2000).

Segundo Kripka (1990), os esforços nas extremidades das barras podem ser calculados separando uma parcela devido às cargas externas aplicadas e outra devido aos deslocamentos relativos de suas extremidades. Dependendo da ordem de grandeza desses deslocamentos, os esforços podem ser significativamente alterados, podendo inclusive haver inversão de sinais, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Esforços nas extremidades da viga devido ao deslocamento diferencial no apoio.



Fonte: GORZA, 2000.

2.2 Estudos sobre análise da sequência construtiva em edifícios

Atualmente, a pesquisa nessa área está aumentando na procura de modelos que representem de maneira mais precisa o comportamento real de estruturas. Diversos trabalhos têm sido publicados ressaltando a necessidade e a importância de se trabalhar com modelos estruturais mais realistas, que envolvam a consideração da sequência de construção e carregamento. A seguir, apresentam-se alguns desses trabalhos em ordem cronológica.

Chakrabarti et al. (1978) abordaram, em seu trabalho, o efeito da análise da sequência de construção. Observaram que a simulação da sequência de construção na análise leva a variações consideráveis nos momentos obtidos quando comparados com uma análise convencional. Segundo os autores, é, portanto, necessário que, para vários andares, o efeito seja levado em consideração. Embora a simulação exata da sequência de construção possa ser difícil, os autores consideram que uma idealização da sequência de construção é desejável para se aplicar nos projetos.

Choi e Kim (1985) publicaram um trabalho no qual analisaram pórticos de andares múltiplos sob ação de cargas de gravidade consideradas de forma sequencial. Esse artigo tratou dos momentos fletores e forças axiais que são produzidos nas barras dos pórticos pelo encurtamento diferenciado das colunas. Foram apresentados dois exemplos, um edifício de 60 andares em aço e outro de 10 andares em concreto. Os resultados do método proposto (com sequência de construção) foram comparados com uma análise convencional considerando o pórtico completo. Os autores observaram que os encurtamentos das colunas e momentos fletores do vigaumento aumentam continuamente até o topo na análise convencional, ocorrendo o contrário na análise sequencial. Segundo os pesquisadores, os resultados obtidos pelas análises convencional e sequencial apresentaram diferenças significativas que não deveriam ser negligenciadas na análise de edifícios altos.

Kripka (1990) enfatiza a importância da consideração da sequência de construção e carregamento na análise de edifícios de concreto, bem como as formas de melhor simular essa sequência. O autor desenvolveu um programa de computador ("ACON") para realizar essa análise e foram obtidos os esforços e deslocamentos durante as etapas de construção, além de pesquisados os esforços extremos. Kripka conclui que o procedimento convencional de análise conduz a resultados pouco confiáveis, uma vez que foram constatadas grandes diferenças entre os resultados obtidos por intermédio da análise sequencial construtiva em comparação com os gerados pelo procedimento convencional de análise.

Wilson et al. (1992) desenvolveram uma abordagem que modifica a solução de análise de elementos finitos, multiplicando ou subtraindo os esforços calculados por intermédio da utilização de fatores de correção para se obter uma solução aperfeiçoada, denominado Método do Fator de Correção (MFC), no qual os fatores de correção são obtidos por curvas estabelecidas a partir de resultados estatísticos de análises de edifícios existentes. Para estabelecer uma curva de fator de correção, uma série de edifícios com vários pavimentos e número de elementos de vários tamanhos foram analisados por dois métodos diferentes: análise de elementos finitos convencional da estrutura como um todo, em que os efeitos de aplicação sequencial de cargas permanentes não são considerados e análise da estrutura considerando a sequência de aplicação das cargas permanentes pelo método de análise de Choi e Kim (1985). Os resultados obtidos pelo método estudado (MFC) foram razoavelmente próximos das soluções obtidas na análise considerando a sequência de construção.

Kripka e Soriano (1992) efetuaram simulações das sequências de construção e carregamento utilizando pórticos planos e tridimensionais de edifícios. A análise das diversas edificações pelo procedimento sequencial, utilizando-se o modelo de pórtico plano, permitiu que os autores confirmassem a importância da utilização desse procedimento para uma melhor reprodução dos esforços e deslocamentos a que as estruturas são submetidas. Os autores chegaram à conclusão que o modelo de pórtico espacial aproxima ainda mais o comportamento real das estruturas.

Kripka e El Debs (1995) realizaram um estudo sobre a influência da variação da resistência do concreto ao longo do tempo, aplicando esse estudo a pórticos de edifícios analisados tanto pelo procedimento convencional quanto pelo procedimento que simula as etapas de construção e carregamento. Os autores evidenciaram em seu estudo a pouca importância da inclusão, nas análises, da consideração da variação da resistência do concreto com a idade, podendo essa variação ser desprezada, desde que utilizado o procedimento sequencial construtivo.

Prado (1999) apresentou um procedimento de análise estrutural que leva em conta a sequência natural de construção. Além disso, propôs uma nova metodologia para verificação dos estados limites considerando a existência das etapas de construção. O trabalho se desenvolveu tendo como alvo as estruturas de edifícios com pavimentos compostos por vigas e lajes. Os resultados desse trabalho deixaram claro que, ao levar em conta o fato de as ações de peso próprio serem introduzidas de forma sequencial sobre estruturas acompanhando o desenvolvimento da construção, tem-se valores de esforços solicitantes e deslocamentos diferentes daqueles obtidos convencionalmente.

Gorza (2000) pretendeu mostrar a importância da análise sequencial construtiva e da colaboração da rigidez transversal das lajes para a estrutura global, além de determinar os esforços e deslocamentos em edifícios metálicos de andares múltiplos, calculados etapa por etapa de construção ou montagem, utilizando o Método dos Elementos Finitos. Assim, observou que os esforços seccionais ocorridos durante essa fase podem superar os esforços finais, isso é, aqueles que surgem durante a ocupação da estrutura já para a finalidade para a qual foi idealizada. Durante alguma etapa intermediária, os esforços desenvolvidos nos elementos podem, inclusive, apresentar troca de sinal em relação aos esforços finais, vindo a acarretar possíveis danos estruturais ou até risco de ruína. O autor verificou que o procedimento convencional de análise, por acumular nos andares superiores da edificação deslocamentos inexistentes, faz com que o deslocamento diferencial vertical cresça ao longo da altura da edificação, atingindo seu valor máximo no topo desta. Já para o procedimento sequencial construtivo, os deslocamentos diferenciais verticais máximos se verificam aproximadamente à meia altura da edificação.

Com o intuito de mostrar que podem existir divergências de resultado entre o modelo estrutural usando cálculo evolutivo e o modelo usando cálculo clássico, Coelho (2003) realizou a análise considerando o cálculo clássico e evolutivo de três pórticos planos. O primeiro modelo, chamado em seu trabalho de SDA caracterizou-se pelo fato de as deformações axiais dos pilares e das vigas serem desprezadas. Além disso, a estrutura foi carregada, simultaneamente, após estar concluída. No modelo CDA, a estrutura também foi carregada simultaneamente, somente após estar concluída, mas, ao contrário do modelo SDA, foram consideradas as deformações axiais dos pilares e das vigas. No modelo EVOL, que representa melhor o que ocorre na realidade, a estrutura foi carregada à medida que foi construída, e, além disso, as deformações axiais dos pilares foram consideradas. Variaram-se os valores de parâmetros que, direta ou indiretamente, interferem nos resultados de deslocamentos e esforços, tais como: rigidez à flexão das vigas, rigidez axial dos pilares e altura do pórtico. O autor

comparou os resultados obtidos através dos três modelos e observou uma grande discrepância entre eles. Segundo o pesquisador, o caminho mais viável para obter convergência de resultados nos modelos analisados é uniformizar as tensões normais médias nos pilares de cada andar.

Com o objetivo de mostrar a necessidade de levar em consideração as deformações axiais nos pilares e as etapas de construção e carregamento, Mateus (2003) desenvolveu quatro modelos distintos de cálculo estrutural. Um primeiro modelo, no qual os pilares são simulados por molas translacionais, foi desenvolvido para mostrar a importância das deformações axiais nos pilares. Dois modelos clássicos (com e sem deformação axial dos pilares), nos quais a estrutura é suposta pronta e carregada simultaneamente, foram também apresentados e comparados com um quarto modelo, que levou em consideração as etapas de construção e carregamento. Os resultados dos demais modelos divergiram bastante do modelo que simula as sequências construtivas e de carregamento. Os resultados de todos os modelos se afastaram consideravelmente do modelo de cálculo evolutivo. O modelo LAJE-EVOL apresentado foi o mais adequado para a análise de edifícios altos, por considerar a sequência natural de construção e entrada dos carregamentos.

Carvalho (2004) analisou, em trabalho desenvolvido, uma estrutura de 30 andares composta por lajes, vigas e pilares. Considerou, para tal, quatro modelos estruturais tridimensionais distintos: dois modelos clássicos, com e sem deformação axial dos pilares, nos quais todo o carregamento atua simultaneamente após a estrutura concluída, e dois modelos de cálculo evolutivo, um mais realista do que o outro, nos quais os pilares sofrem deformação axial e a estrutura é carregada gradativamente à medida que é construída, considerando as etapas de construção e carregamento. Utilizou o método dos elementos finitos. Considerou as cargas verticais nas lajes, vigas e pilares; não considerou cargas laterais devido ao vento; não foi abordada a questão da estabilidade lateral do edifício; foi considerada a análise elástico-linear; nas vigas e pilares, além das deformações de flexão, de torção e axial, considerou também as deformações de cisalhamento. O autor salienta que nem sempre a situação mais desfavorável para um determinado elemento estrutural ocorre quando a estrutura está concluída com o carregamento final atuando. Um determinado elemento estrutural pode ser mais solicitado durante a construção. Baseado nas análises feitas, concluiu que o modelo de cálculo evolutivo, no qual se consideram as etapas de construção e carregamento, é superior aos modelos clássicos, procurando utilizá-lo na análise estrutural de edifícios altos.

O objetivo principal do trabalho de Freitas (2004) consistiu na análise comparativa entre as condições usualmente empregadas em projetos de edifícios de concreto armado e aquelas provenientes de ações de construção, com o emprego do método das estruturas primárias

desenvolvido por Prado (1999), verificando os estados limites durante a construção. Teve por objetivo realizar as análises somente para lajes e vigas dos pavimentos. Considerou edifícios com diferentes subsistemas horizontais, alterando-se o sistema de escoramento e o ciclo de construção. As condições de construção foram comparadas com aquelas usualmente empregadas no projeto estrutural que considera o edifício submetido às ações finais e com resistência do concreto aos 28 dias, buscando evidenciar as que são críticas.

Kim et al. (2012) propuseram, em seu trabalho, um método para análise de encurtamento de colunas, considerando as sequências de construção, o efeito dos membros horizontais, bem como fluência e retração. Como exemplo numérico, investigaram o encurtamento de colunas de um edifício de concreto armado de 70 pavimentos. Os autores salientam que encurtamentos diferenciais de colunas devem ser cuidadosamente avaliados na fase de concepção ou fase de construção de um edifício alto, porque podem danificar não apenas os elementos estruturais, mas também os elementos não estruturais, tais como divisórias, entre outros.

Além dos trabalhos citados, diversos autores evidenciaram, em seus estudos, que o efeito da sequência de construção e carregamento deve ser levado em consideração na análise de edifícios, destacando-se: Liu et al. (1985), Stivaros e Halvorsen (1990), Mossolan e Chen (1991), Lee et al. (1991), El shahhat e Chen (1992), Kripka e Chamberlain (1993), Duan e Chen (1995), Fang et al. (2001), Prado et al. (2003), Santos (2006), Silva (2006), Azkune et al. (2007), Marín (2008), Alvarado et al. (2009), Nielen *apud* Fang et al. (2009), Dongping et al. (2009), Vafai (2009), Moragaspiya et al. (2010), Negreiros (2010), Kim e Shin (2011), Calderon et al. (2011), Grundy e Kabaila *apud* Molina (2012), Harsha e Vikranth (2014), Pathan et al. (2014), Roque (2014), Menon e Nogueira (2015), Santos e Ribeiro (2015), Soares (2015), e Rocha (2016). O Quadro 1 apresenta de forma resumida a principal abordagem dos estudos comentados.

Quadro 1 – Síntese dos trabalhos descritos.

Autores	Abordagem
Chakrabarti et al. (1978)	Analisou a sequência de construção em edifícios
Choi e Kim (1985)	Analisou pórticos de andares múltiplos sob ação de cargas de gravidade consideradas de forma sequencial
Kripka (1990)	Comparou o procedimento convencional de análise com o procedimento sequencial construtivo
Wilson et al. (1992)	Desenvolveram uma abordagem que modifica a solução de análise convencional – fator de correção (MFC)
Kripka e Soriano (1992)	Simularam as sequências de construção e carregamento utilizando pórticos planos e tridimensionais de edifícios
Kripka e El Debs (1995)	Avaliaram a influência da evolução da resistência do concreto na fase de construção de edifícios
Prado (1999)	Apresentou um procedimento de análise estrutural que leva em conta a sequência natural de construção
Gorza (2000)	Elaborou um programa computacional que efetua a análise elástica linear tanto pelo procedimento convencional como pelo procedimento sequencial construtivo
Coelho (2003)	Realizou a análise considerando cálculo clássico e evolutivo de três pórticos planos
Mateus (2003)	Desenvolveu quatro modelos distintos de cálculo estrutural – um deles considerando a sequência de construção
Carvalho (2004)	Analisou quatro modelos estruturais tridimensionais distintos – dois clássicos e dois evolutivos
Freitas (2004)	Comparou as condições usualmente empregadas em projetos de edifícios de concreto armado com aquelas provenientes de ações de construção
Kim et al. (2012)	Propuseram um método para análise de encurtamento de colunas, considerando as sequências de construção

Fonte: Elaborado pela autora.

2.3 Ações de efeito construtivo

A carga acidental de construção, de acordo com o *American Concrete Institute* (ACI-347, 2005), equivale ao peso dos trabalhadores, pistas, armazenamento de material, equipamentos e cargas de impacto. A natureza e a intensidade dessas cargas acidentais de

construção mudam dependendo do estágio de construção. Segundo a ACI-347 (2005), para se ter uma melhor compreensão dessas cargas acidentais durante a construção de edifícios de concreto armado, é importante entender o ciclo de construção de edifícios de múltiplos pavimentos em concreto armado.

De acordo com Ayoub e Karshenas (1994), as cargas de construção incluem o peso de trabalhadores, equipamentos e materiais armazenados nas lajes. A estimativa dessas cargas é dificultada pela natureza variável que elas possuem. Os autores sugerem uma carga de construção uniformemente distribuída de $0,3 \text{ kN/m}^2$ no andar superior.

O comitê ACI 347 (2005) recomenda para as ações variáveis (peso dos trabalhadores, equipamentos, materiais, entulhos, impacto produzido pelo lançamento do concreto, entre outros) um valor igual a $2,4 \text{ kN/m}^2$, não especificando se elas atuariam em todos os pavimentos, só nos que pertencem ao sistema de suporte ou, ainda, apenas no que está sendo preparado para a concretagem.

O *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA, 1972 *apud* Prado 1999) recomenda um valor igual a 1 kN/m^2 também não especificando em que momento essa carga atuaria.

A exemplo do que faz a norma brasileira de formas, alguns autores sugerem etapas nas quais essas ações atuariam.

Prado (1999) considera unicamente uma ação vertical que corresponde a 85% do peso próprio do pavimento, atuante só no momento da concretagem. Segundo o autor, para as ações variáveis, isso é coerente, pois reflete uma média dos valores indicados pela bibliografia.

A determinação de valores para as ações a serem utilizadas durante o período de construção aparece na normatização brasileira, na norma ABNT NBR 15696 (2009) – Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto, que recomenda uma sobrecarga mínima de $2,0 \text{ kN/m}^2$ para o dimensionamento de fôrmas e escoramentos, referente aos serviços de lançamento, adensamento e acabamento do concreto. Já para o projeto de escoramentos remanescentes e reescoramentos, essa mesma norma recomenda uma sobrecarga de utilização dos pavimentos, no processo evolutivo das concretagens e demais etapas executivas de obra não inferior a $1,0 \text{ kN/m}^2$.

No modelo proposto no trabalho de Vivacqua (2009), o valor considerado nas lajes foi de $2,0 \text{ kN/m}^2$, que corresponde à sobrecarga de trabalho na execução dos serviços de lançamento, adensamento e acabamento do concreto.

Simavorian (2015) utilizou, em seu trabalho, uma sobrecarga de $1,5 \text{ kN/m}^2$ até a retirada total do escoramento, e, após isso, esse valor aumentou para 3 kN/m^2 .

O Quadro 2 apresenta um resumo dos principais valores de cargas mencionados.

Quadro 2 – Síntese das cargas consideradas na literatura.

Autores	Consideração de cargas
Ayoub e Karshenas (1994)	Sugerem uma carga de construção uniformemente distribuída de 0,3 kN/m² no andar superior
ACI 347 (2005)	Recomenda um valor igual a 2,4 kN/m² , não especificando o momento de atuação da carga
Osha (1972) <i>apud</i> Prado (1999)	Recomenda um valor igual a 1 kN/m² também não especificando em que momento essa carga atuaria
Prado (1999)	Considerada unicamente uma ação vertical que corresponde a 85% do peso próprio do pavimento , atuante só no momento da concretagem
ABNT NBR 15696 (2009)	Recomenda uma sobrecarga mínima de 2,0 kN/m² para o dimensionamento de fôrmas e escoramentos, referente aos serviços de lançamento, adensamento e acabamento do concreto.
Vivacqua (2009)	Considerou nas lajes 2,0 kN/m² , valor correspondente à sobrecarga de trabalho na execução dos serviços de lançamento, adensamento e acabamento do concreto. Para o projeto de escoramentos remanescentes e reescoramentos, valor não inferior a 1 kN/m²
Simavorian (2015)	Utilizou em seu trabalho uma sobrecarga de 1,5 kN/m² até a retirada total do escoramento, após, esse valor aumenta para 3 kN/m²

Fonte: Elaborado pela autora.

2.4 Medições de encurtamentos axiais de colunas em edificações

Segundo Rocha (2016), um dos principais comportamentos a ser analisado em estruturas é o encurtamento dos elementos verticais. Existem dois fatores associados ao encurtamento de pilares que afetam o comportamento e o funcionamento de edifícios altos: o encurtamento axial e o diferencial. O encurtamento axial é o encurtamento total acumulado, que ocorre devido a deformações elásticas, fluência e retração. O encurtamento diferencial é a diferença entre dois encurtamentos resultantes no mesmo nível.

Nas diferentes etapas de construção, é importante conhecer as deformações causadas pela sucessão de incrementos de carga a que estão sujeitos os elementos, podendo os

deslocamentos verticais relativos ter grande importância no que toca a esforços e distorções de elementos horizontais, bem como nos elementos não estruturais (ROCHA, 2016).

O encurtamento diferencial terá como consequência a redistribuição de esforços entre os elementos verticais, sendo que os elementos que anteriormente experimentavam menores encurtamentos irão estar sujeitos agora a uma maior carga, “aliviando” os elementos mais carregados. Devido a essa distribuição de esforços pelos elementos verticais, os esforços, com especial realce os momentos nos elementos horizontais, como vigas, sofrem alterações, podendo ocorrer um excedente de esforço para o qual foram projetadas (ROCHA, 2016).

Vários pesquisadores avaliaram o encurtamento axial dos elementos verticais de edifícios usando diferentes técnicas, conforme registrado na literatura especializada.

No estudo realizado por Choi et al. (2013), foi apresentado um sistema prático para monitorar o encurtamento de colunas em um edifício alto em construção. O sistema de monitoramento proposto compreendeu um sistema de detecção sem fio e um *software* de monitoramento. O sistema foi aplicado a dois prédios, um com 66 andares e outro com 72 andares, em construção. O sistema permitiu medições automáticas e em tempo real do encurtamento dos membros verticais.

Kang et al. (2013) realizaram o monitoramento do encurtamento axial de colunas em um edifício comercial localizado no Vietnã. Para o monitoramento dessa edificação, os autores utilizaram *Strain Gages*.

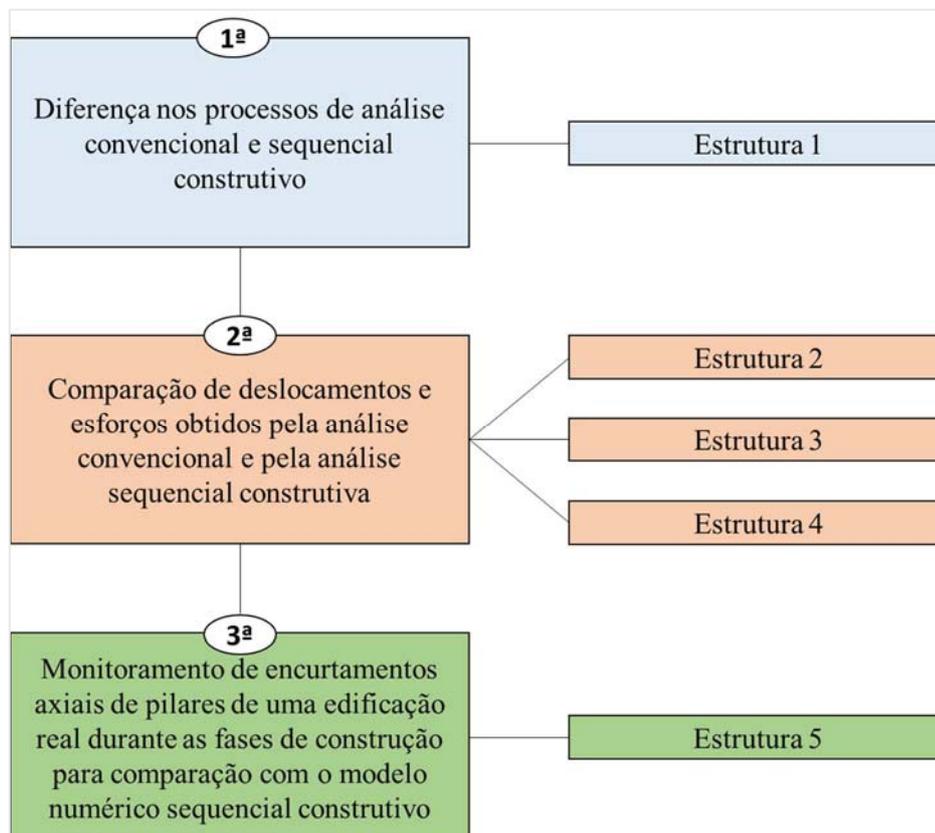
Bresford (1970 *apud* ARACHCHILAGE, 2016) usou *Strain Gages* e estação total para medições de encurtamentos axiais. Ele concluiu que a configuração da estação total pode ser usada com sucesso para medir a diferença absoluta nos encurtamentos de colunas. No entanto, esse método torna-se não viável quando o estágio de construção da obra avança e determinadas etapas têm início.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo, aborda-se a fundamentação geral no que diz respeito aos procedimentos adotados neste trabalho.

A Figura 4 apresenta o fluxograma das fases do trabalho para o alcance dos objetivos propostos, as quais ocorreram em três etapas principais. A primeira etapa constitui-se de uma simulação numérica para o estudo da diferença dos processos de análise convencional e sequencial construtivo (Estrutura 1). Na segunda etapa do trabalho, também foram realizadas simulações numéricas para a comparação de deslocamentos e esforços obtidos pela análise convencional e pela análise sequencial construtiva (Estruturas 2, 3 e 4). A terceira e última etapa tratou do monitoramento de encurtamentos axiais de pilares de uma edificação real durante as várias fases de construção, para comparação com o modelo numérico sequencial construtivo dessa edificação (Estrutura 5).

Figura 4 – Fluxograma das etapas para o desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

1ª etapa: Para a primeira etapa desta pesquisa, elaborou-se, primeiramente, uma planta baixa de arquitetura que fosse representativa de uma estrutura de concreto armado de múltiplos pavimentos.

Na primeira análise numérica realizada, intitulada de Estrutura 1, foi adotada uma planta baixa de uma edificação de cinco pavimentos, com a finalidade de expor de forma simples e objetiva as diferenças entre os processos de análise convencional e sequencial construtivo. Foi calculado o carregamento atuante e considerou-se o edifício como um pórtico plano. Para essa análise, foi utilizado o *software* Ftool.

2ª etapa: Nas análises numéricas subsequentes (designadas por estruturas 2, 3 e 4), foram utilizadas edificações fictícias, de 5, 12 e 20 pavimentos, respectivamente. Cada estrutura foi trabalhada como um pórtico espacial constituído por elementos de pórtico 3D (vigas e pilares) e elementos de grelha (lajes) na análise tridimensional. Para essas análises, foi utilizado o *software* TQS V19.

As simulações numéricas realizadas para as estruturas 2, 3 e 4 foram subdivididas em: características da estrutura analisada, modelos e carregamentos, considerações, comparações realizadas e resultados obtidos.

Nas características da estrutura, foram apresentadas as principais particularidades de cada uma das estruturas analisadas no trabalho.

No item referente a modelos e carregamentos, foram criados dois modelos de cálculo, em cada caso, sendo o primeiro denominado de modelo convencional e o segundo de modelo sequencial construtivo. O que diferiu um modelo de outro é que, no primeiro, a estrutura foi modelada e carregada de uma única vez, enquanto, no segundo, foram modeladas as sequências de construção, e, junto com essas, foram atribuídos os carregamentos para cada etapa. Considerou-se o mesmo carregamento final para os dois modelos, porém, esses se diferenciaram pela sequência em que o carregamento solicitou a estrutura. Tanto as cargas utilizadas quanto os modelos foram identificados por meio de figuras e quadros. No item considerações, foram destacadas as principais observações referentes a cada análise.

Em comparações realizadas, foram elencados os itens analisados para cada estrutura. As comparações ocorreram em termos de esforços, deslocamentos e dimensionamento, obtidos por meio das duas análises (convencional e sequencial construtiva), verificando as principais diferenças decorrentes e também a importância dessas diferenças no tratamento mais realista do desempenho estrutural dos edifícios de múltiplos andares em concreto armado.

As comparações foram realizadas em alguns pontos e elementos estruturais considerados importantes para o estudo. Os deslocamentos foram obtidos sempre nos nós superiores do pórtico espacial, mais precisamente no encontro de viga com pilar.

Para uma melhor apresentação, os resultados foram dispostos em gráficos e tabelas que, além de exibirem os resultados obtidos para cada modelo, apresentam a diferença obtida de um processo de análise em relação ao outro e as principais discussões.

Todos esses itens estão detalhados dentro do capítulo 4, para uma melhor compreensão do estudo.

3ª etapa: Na terceira etapa do trabalho, foi realizada a quinta e última simulação numérica, tratando-se de uma edificação real de 19 pavimentos (Estrutura 5). Em um primeiro momento, essa simulação serviu como mais um exemplo de edificação analisada. As plantas de formas da edificação foram reproduzidas no *software* TQS com os dados dos elementos estruturais cedidos pelo escritório responsável pelo cálculo estrutural. Foi realizada a simulação numérica da estrutura tanto pelo modelo convencional quanto pelo sequencial construtivo.

Em um segundo momento, foi realizado o monitoramento do encurtamento axial de alguns pilares dessa edificação em obra. Para isso, foi realizada uma visita à edificação e selecionaram-se alguns pilares. Uma vez feita essa seleção, foram escolhidas e instrumentadas as técnicas de medição. Essa etapa contou com o auxílio de empresa especializada na realização de serviços topográficos para garantir a confiabilidade do monitoramento. Após cada concretagem, ao longo da sequência de construção, os encurtamentos axiais dos pilares selecionados foram obtidos, sendo devidamente calculados seus valores.

Em paralelo com os dados obtidos por meio das medições, foi realizada a modelagem da edificação no *software* TQS seguindo a sequência de construção adotada na obra. Procura-se reproduzir, aqui, essa sequência do modo mais próximo possível.

Nesse momento, os encurtamentos axiais medidos na edificação real foram comparados com aqueles obtidos pela análise sequencial construtiva da edificação no *software*.

4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentadas as características, os modelos/carregamentos, as considerações, as comparações realizadas e os resultados obtidos nas análises de cada uma das cinco estruturas abordadas neste trabalho. Inclui-se, nesse item, as discussões acerca dos resultados.

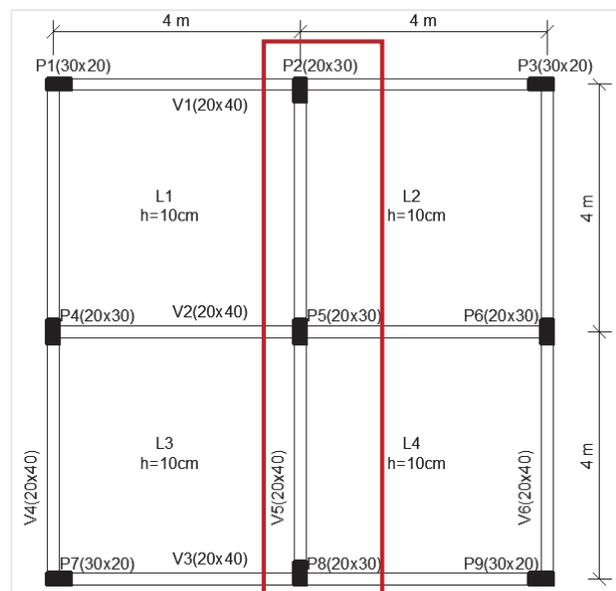
4.1 Estrutura 1

A primeira estrutura analisada trata-se de um pórtico plano. Com a finalidade de expor de forma simples e objetiva as diferenças entre os processos de análise convencional e sequencial construtivo, foi criada uma planta de formas de um edifício de cinco pavimentos (Figura 5). Com base nessa planta e considerando um pé-direito de 3m entre pavimentos, foi lançado no *software* Ftool o pórtico plano central indicado.

Consideraram-se como parâmetros para a análise:

- Material: concreto armado.
- Módulo de elasticidade longitudinal (E): 25000 MPa.
- Coeficiente de Poisson (ν): 0,2.
- Coeficiente de dilatação térmica (α): $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.
- Condição de vinculação na base: engaste.

Figura 5 – Planta de formas.

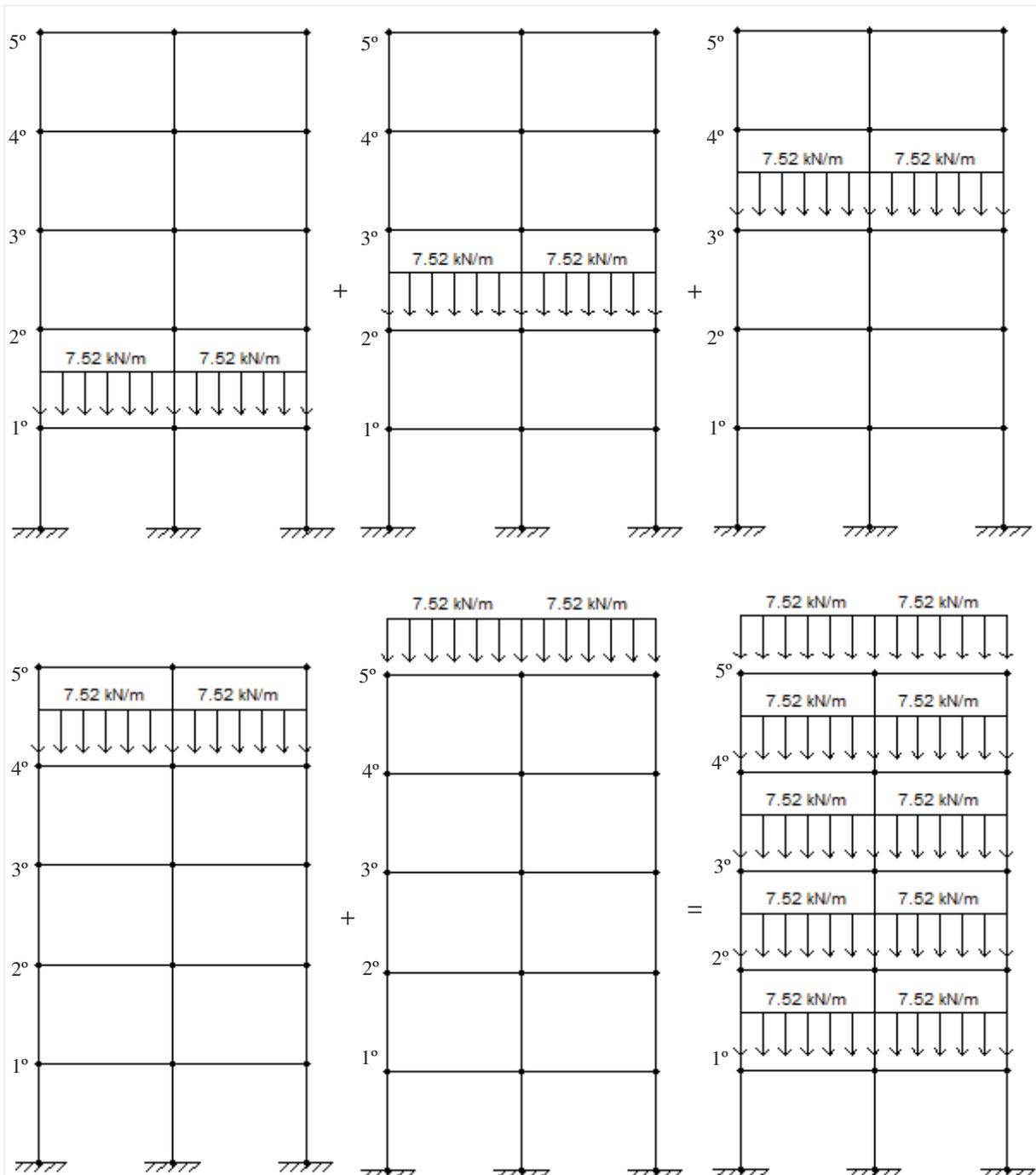


Fonte: Elaborado pela autora.

Posteriormente, foi calculado o carregamento que atua na viga central (V5). O carregamento utilizado para a comparação dos modelos de análise foi de 7,52 kN/m, obtido com base no peso próprio da viga 5 mais o peso das lajes que é distribuído sobre a viga, definido pelo processo de áreas de influência.

Na análise convencional, partiu-se do princípio de que toda a estrutura já existe quando é carregada (Figura 6).

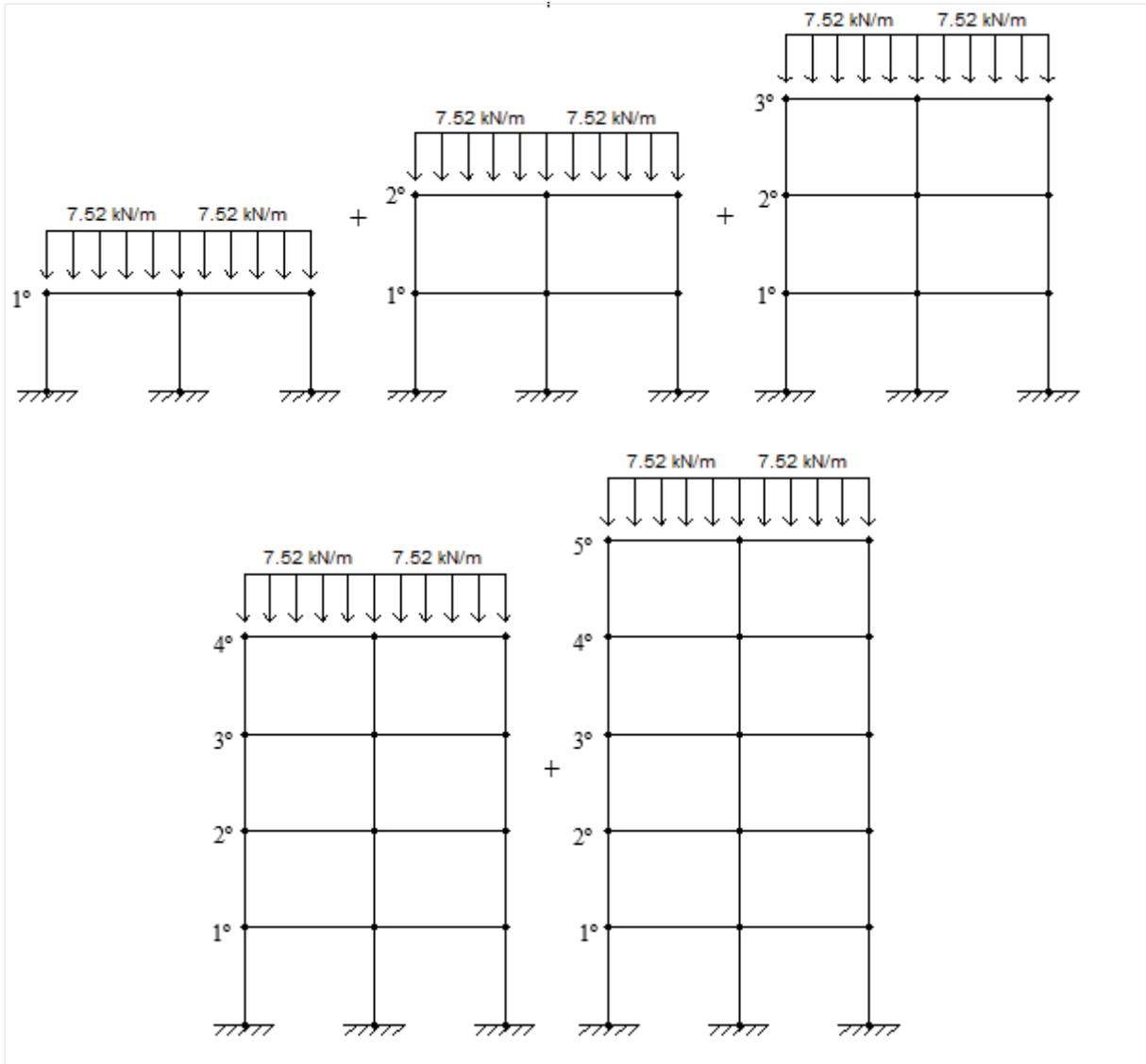
Figura 6 – Edifício de cinco pavimentos considerando-se a análise convencional.



Fonte: Elaborado pela autora.

Já na análise sequencial construtiva, o mesmo carregamento foi aplicado à estrutura na medida em que é construída (Figura 7).

Figura 7 – Edifício de cinco pavimentos considerando-se a análise sequencial construtiva.



Fonte: Elaborado pela autora.

A principal diferença entre os processos de análise está na forma de computar os deslocamentos.

Computando-se os deslocamentos diferenciais verticais (também denominados de encurtamentos axiais diferenciais) entre os nós superiores dos pilares centrais e extremos e fazendo a superposição dos efeitos, nota-se que, na análise convencional, os deslocamentos diferenciais entre os nós dos pilares crescem ao longo da altura da edificação, atingindo valores

máximos no seu topo. Esse efeito gera valores incorretos de momentos fletores em vigas e lajes que estão ligadas aos pilares.

Já na análise sequencial construtiva, os carregamentos aplicados no andar construído não geram esforços nos andares superiores. Dessa forma, ocorrendo a superposição dos efeitos, é possível observar que os deslocamentos diferenciais verticais se alteram progressivamente ao longo do período de construção.

A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam os deslocamentos absolutos e diferenciais dos pilares 2 e 5, medidos nos nós superiores ao longo dos 5 pavimentos, pelo modelo de análise convencional e sequencial construtivo.

Tabela 1 – Deslocamentos absolutos (em mm).

Pavimentos	Deslocamentos absolutos (mm)			
	Análise Convencional		Análise sequencial construtiva	
	P2	P5	P2	P5
1	0,14	0,30	0,13	0,32
2	0,26	0,55	0,22	0,52
3	0,35	0,73	0,25	0,58
4	0,41	0,85	0,22	0,51
5	0,44	0,92	0,14	0,32

Fonte: Elaborado pela autora.

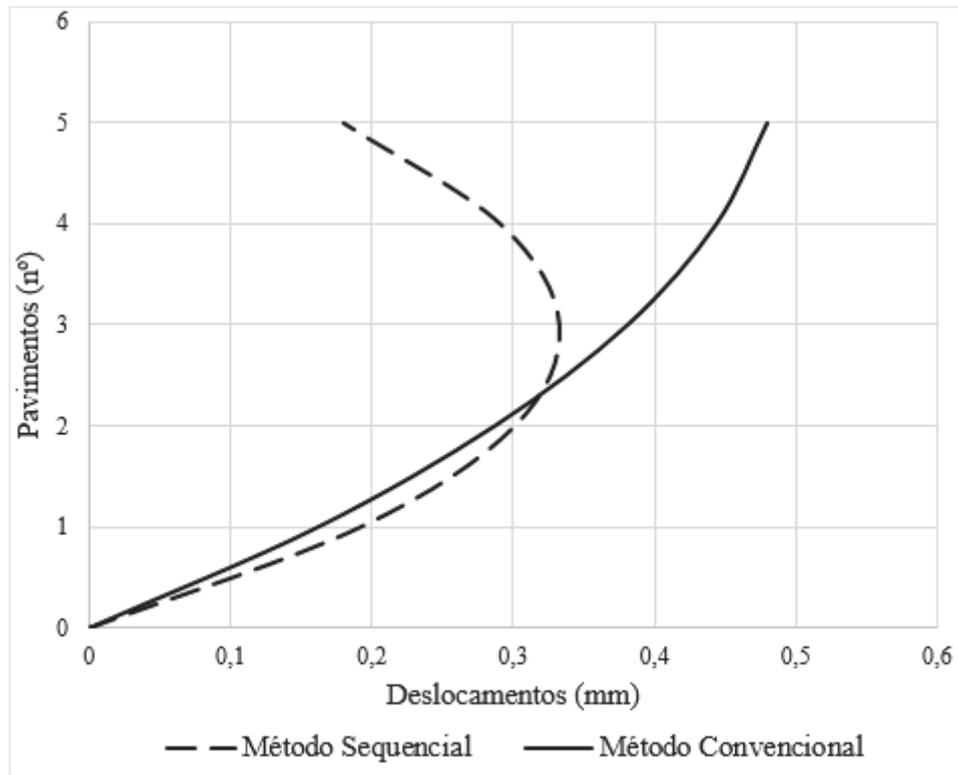
Tabela 2 – Deslocamentos diferenciais (em mm).

Pavimentos	Deslocamentos Diferenciais (mm)	
	Análise Convencional	Análise sequencial construtiva
	P5-P2	P5-P2
1	0,16	0,19
2	0,29	0,30
3	0,38	0,33
4	0,44	0,29
5	0,48	0,18

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 8, pode-se observar a diferença da evolução dos deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P5 e P2 pelos dois métodos de análise.

Figura 8 – Deslocamentos diferenciais verticais (P2-P5).

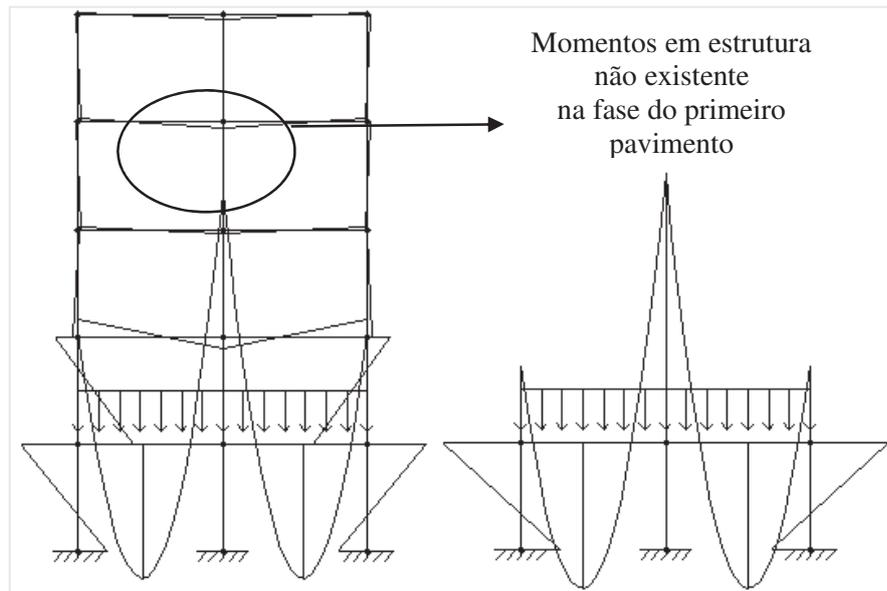


Fonte: Elaborado pela autora.

Uma das justificativas para validar a proximidade dos valores de deslocamentos obtidos na análise sequencial construtiva com o comportamento real de um edifício é a de que, quando um andar é construído e é feita a retirada das escoras, ocorrem os deslocamentos no andar devido ao seu peso próprio. O andar superior será executado nivelado, portanto, os deslocamentos do andar inferior são considerados nulos para efeito de cálculo dos esforços nesse andar, e assim sequencialmente para os demais pavimentos superiores, tornando inválidos os deslocamentos obtidos pela análise convencional.

Outro aspecto importante de se observar é o fato de que, na análise convencional, se estaria considerando esforços na estrutura de elementos que sequer foram construídos, conforme pode ser visto na Figura 9, para os momentos fletores. Em contrapartida, esses elementos não podem contribuir com sua rigidez quando os elementos dos andares inferiores são solicitados.

Figura 9 – Momentos fletores (análise convencional *versus* análise sequencial construtiva).



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Estrutura 2

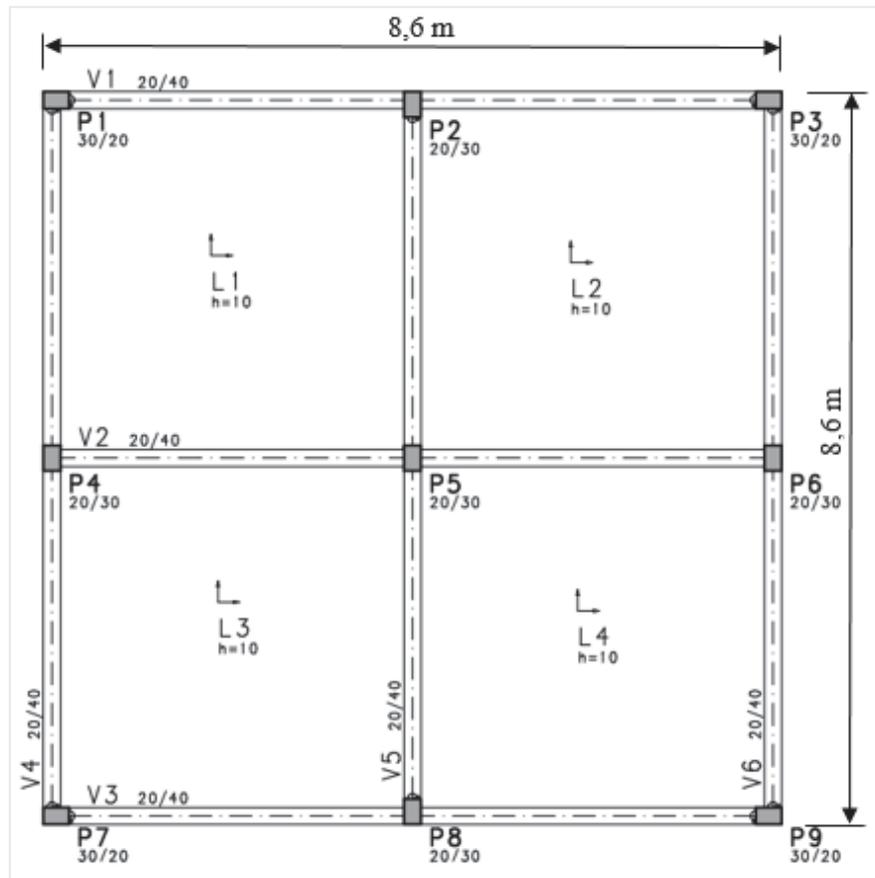
4.2.1 Características da estrutura analisada

A estrutura 2 trata-se de um edifício comercial (escritórios) de andares múltiplos com as seguintes características:

- A estrutura é fictícia e composta por cinco pavimentos com pé-direito de 3 metros.
- A estrutura tem dimensões em planta de 8,60m x 8,60m.
- Composta por lajes, vigas e pilares.
- Considerou-se todos os pilares engastados na fundação.
- Cinco dos pilares têm seção de 20 cm x 30 cm e o restante tem seção de 30 cm x 20 cm ao longo de toda a altura do edifício.
- As seis vigas têm a mesma seção de 20 cm x 40 cm em todos os pavimentos.
- As quatro lajes são maciças e têm espessura de 10 cm em todos os pavimentos.
- Estrutura de concreto armado com resistência característica à compressão de 25 MPa.

A Figura 10 apresenta a planta de formas do pavimento tipo.

Figura 10 – Planta de formas do pavimento tipo.



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

4.2.2 Modelos e carregamentos

Para demonstrar a influência das etapas de construção e carregamento nos resultados obtidos, foram analisados dois modelos tridimensionais distintos denominados de modelo 1 e modelo 2, tendo o modelo 2 sido analisado de duas maneiras diferentes, por modelagem etapa por etapa e também com a utilização do módulo efeito incremental presente no *software* TQS V19.

Considerou-se o mesmo carregamento final para os dois modelos, porém, estes se diferem pela sequência em que o carregamento solicita a estrutura.

Ambos os modelos estão sujeitos, em geral, às seguintes cargas verticais, onde adotou-se a seguinte notação:

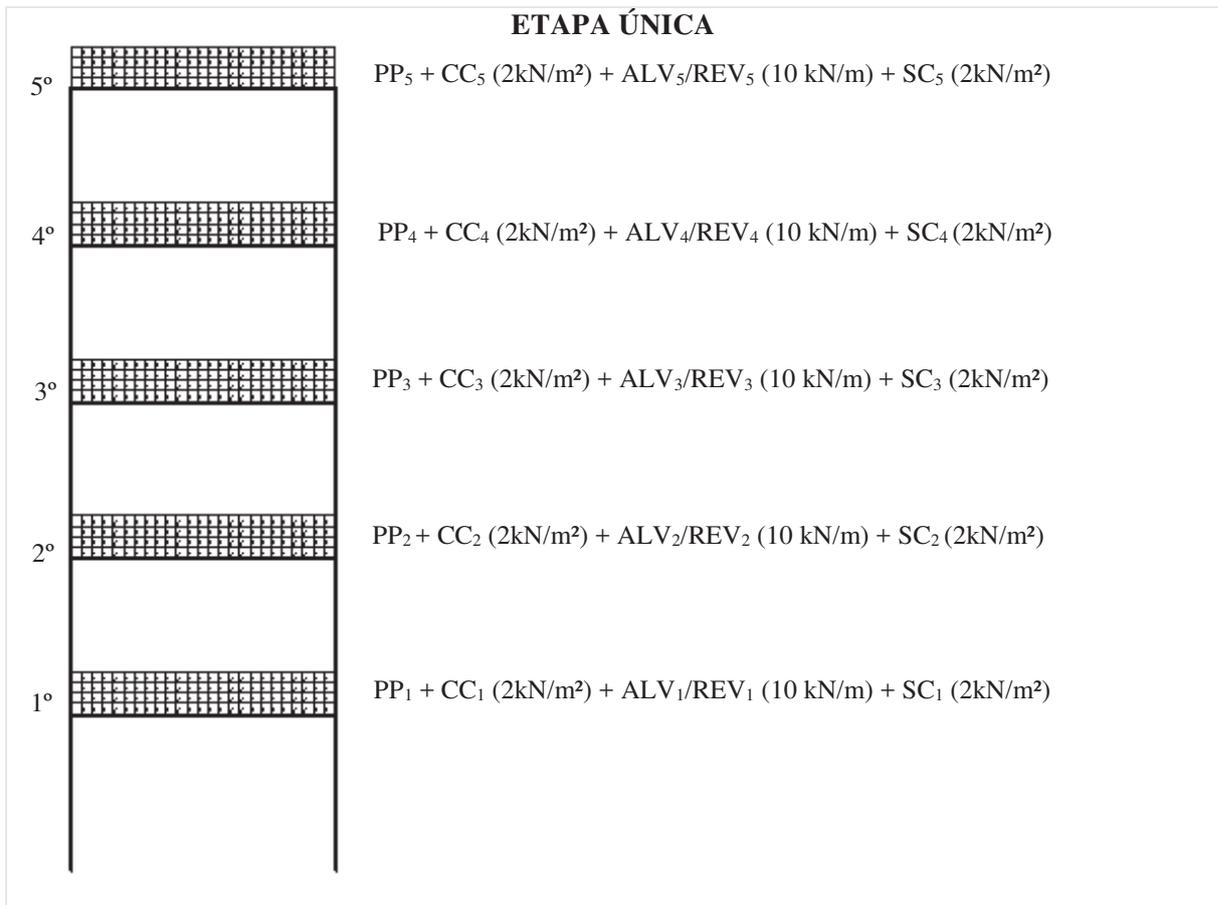
- P_{Pi} = peso próprio no andar i (a).
- C_{Ci} = carga de construção no andar i (b).
- AL_{Vi}/RE_{Vi} = alvenaria e revestimento no andar i (c).
- S_{Si} = sobrecarga (carga de ocupação) no andar i (d).

- a) O peso próprio é obtido automaticamente pelo *software* de cálculo estrutural.
- b) A carga de construção (CC) adotada para a análise foi a indicada pela ABNT NBR 15696 (2009), cujo valor é de 2 kN/m², e foi considerada em todas as lajes.
- c) A soma da carga de alvenaria com a de revestimento totaliza 10 kN/m, carga que foi adotada para todas as vigas do projeto.
- d) A sobrecarga (SC) considerada foi obtida pela ABNT NBR 6120 (1980), tabela 2, que indica uma carga mínima vertical para escritórios de 2 kN/m².

A carga de construção somada à carga de ocupação totaliza 4 kN/m² de carga acidental atuando nas lajes.

Modelo 1: A análise foi feita levando-se em conta que as cargas atuantes em toda estrutura são supostas atuando simultaneamente após a estrutura concluída, denominado de modelo convencional. Para essa análise, foi modelada uma única estrutura, sujeita às cargas indicadas na Figura 11 e descritas neste item.

Figura 11 – Representação esquemática da estrutura e carregamento do modelo convencional.



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

Na Figura 12, está apresentado um esquema tridimensional da estrutura analisada.

Figura 12 – Modelo convencional - representação tridimensional da estrutura.



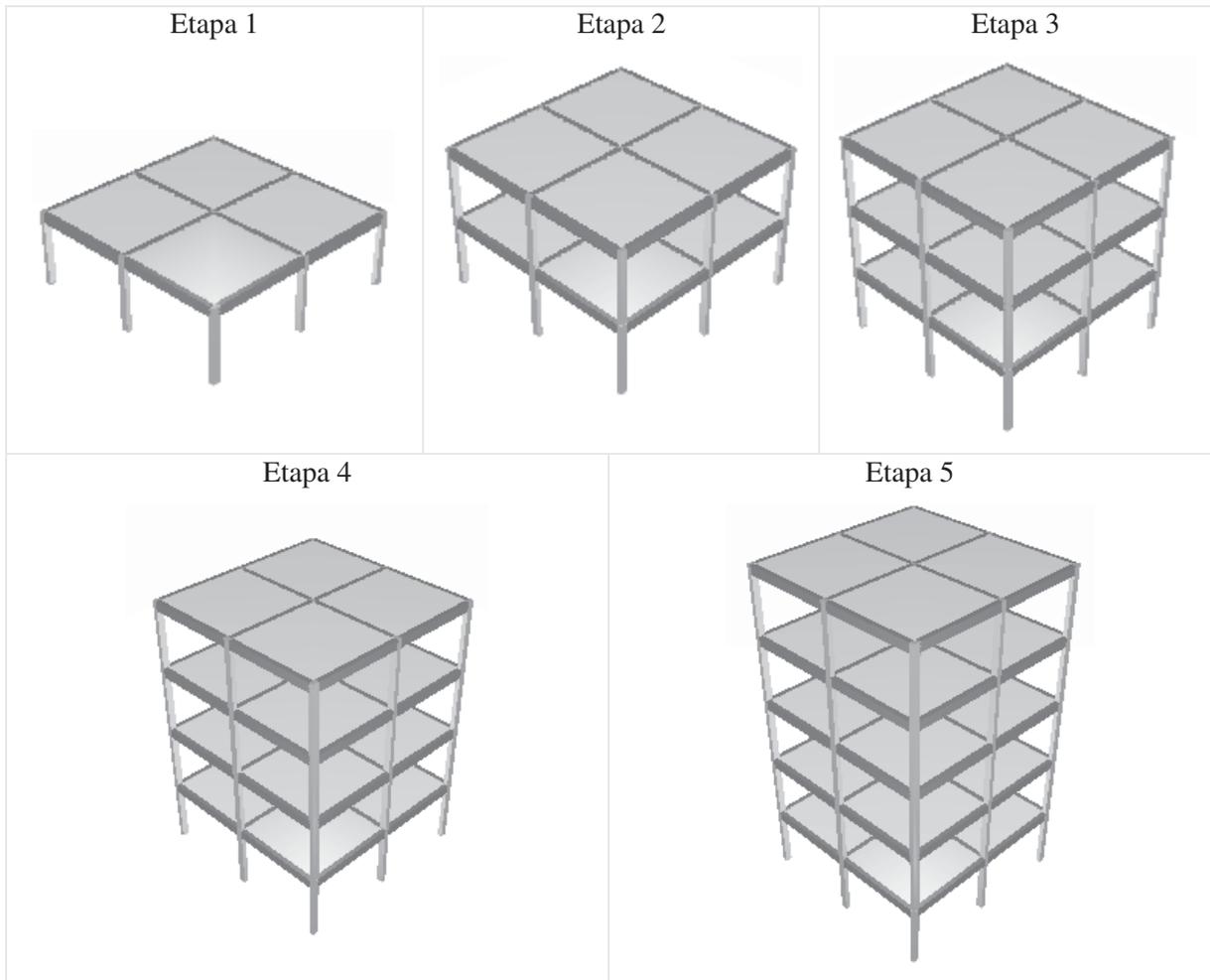
Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

A consideração utilizada no modelo 1 não é realista. Na verdade, o único carregamento que só solicita a estrutura pronta é a carga de ocupação (sobrecarga), sendo que todos os demais carregamentos solicitam ou podem solicitar a estrutura parcialmente construída.

No modelo 1, como todo o carregamento atua simultaneamente após a estrutura concluída, ocorre, por exemplo a seguinte situação: o peso próprio do primeiro andar afeta os esforços na estrutura do 5º andar. Essa situação é questionável, uma vez que não é possível o peso próprio do 1º andar afetar os esforços no 5º andar, visto que, quando essa carga é introduzida, o 5º andar ainda não foi construído.

Modelo 2: A estrutura é carregada segundo a sequência natural de construção, andar por andar, considerando as etapas de construção e carregamento, denominado de modelo sequencial construtivo. Para essa análise, foram modeladas e calculadas cinco etapas, sujeitas a oito carregamentos, conforme pode ser observado na Figura 13. A etapa 5 foi lançada quatro vezes, referindo-se a edificação inteira, estando em cada uma delas, sujeita a um carregamento distinto.

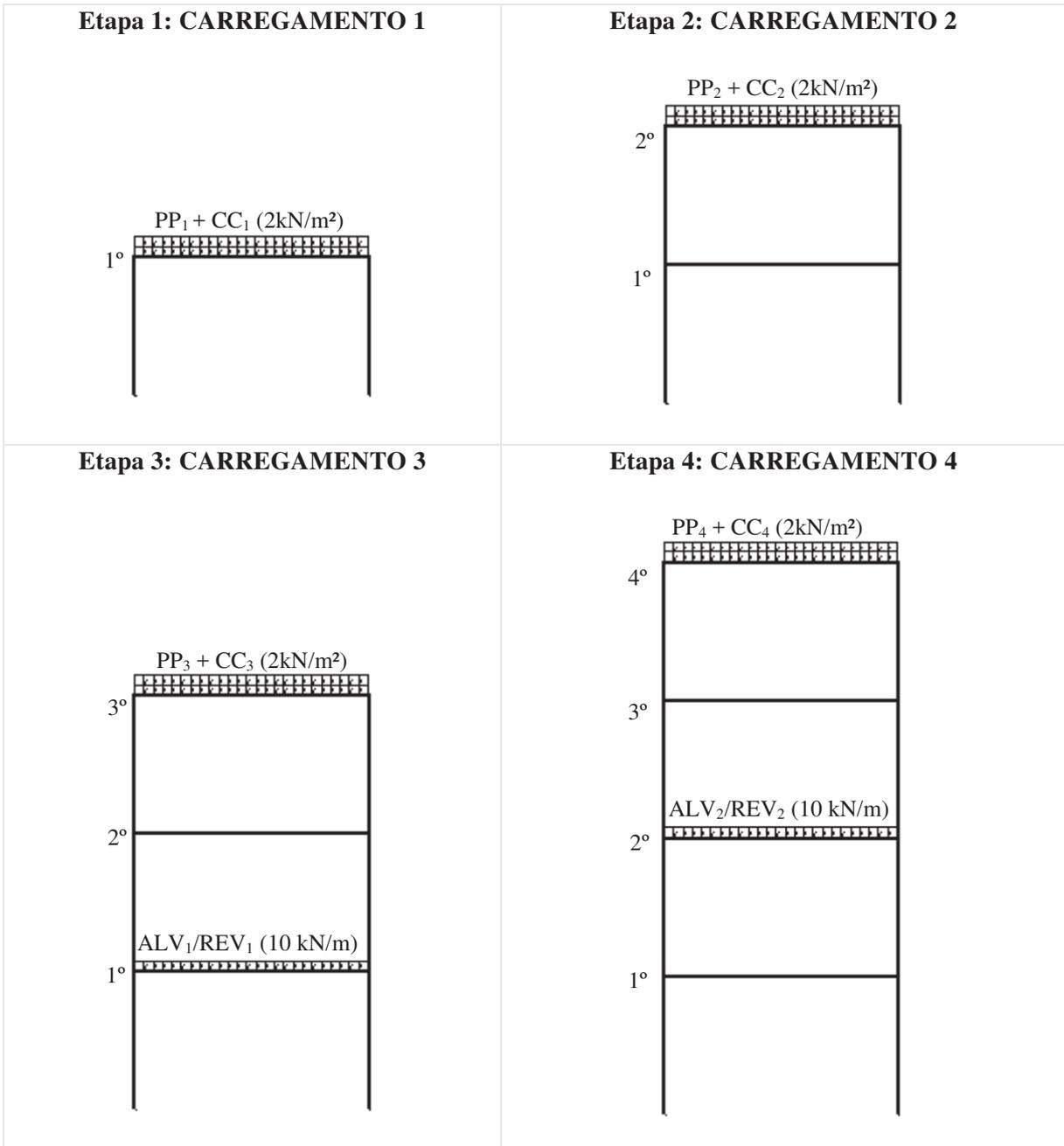
Figura 13 – Modelo sequencial construtivo - representação tridimensional das estruturas.



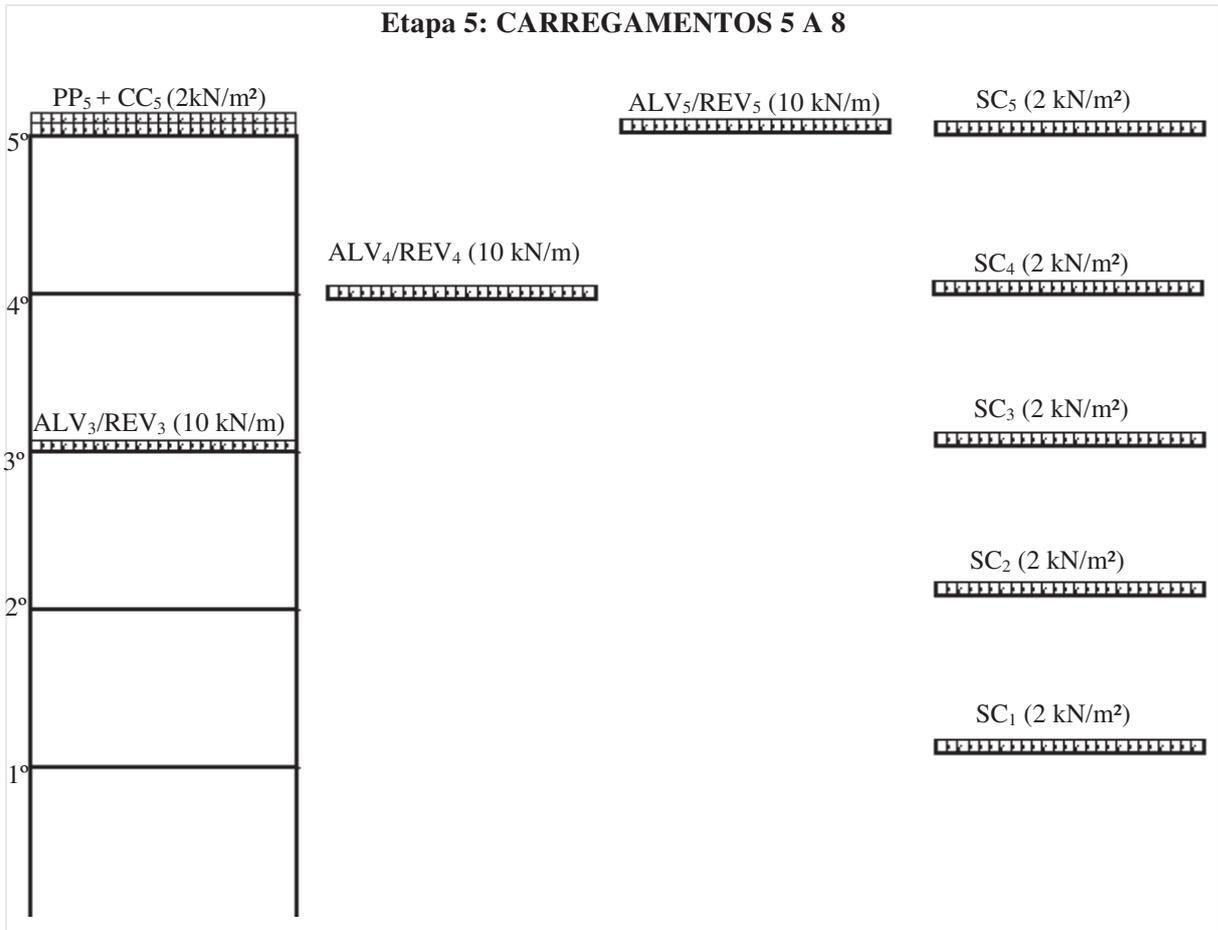
Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

Para um melhor entendimento da sequência de carregamento adotada no modelo sequencial construtivo, apresenta-se, na Figura 14, um esquema das etapas calculadas e dos carregamentos que as solicitam.

Figura 14 – Representação esquemática das estruturas e carregamentos do modelo sequencial construtivo.



Continuação ...



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

Nesse tipo de análise, os resultados finais são obtidos pela soma dos resultados de cada uma das etapas de carregamento (princípio da superposição dos efeitos).

O Quadro 3 mostra um resumo das etapas, carregamentos e sua descrição.

Quadro 3 – Resumo das etapas e carregamentos do modelo sequencial construtivo.

Etapa	Carregamento	Descrição do carregamento
1	1	PP ₁ + CC ₁
2	2	PP ₂ + CC ₂
3	3	PP ₃ + CC ₃ + ALV ₁ /REV ₁
4	4	PP ₄ + CC ₄ + ALV ₂ /REV ₂
5	5	PP ₅ + CC ₅ + ALV ₃ /REV ₃
	6	ALV ₄ /REV ₄
	7	ALV ₅ /REV ₅
	8	SC ₁ a SC ₅

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que, no modelo de cálculo sequencial construtivo, um esforço E_{ij} qualquer, devido ao carregamento número j , deve ser calculado obrigatoriamente na primeira estrutura parcialmente construída capaz de suportá-lo. Com isso, um elemento estrutural que esteja desde o primeiro instante na estrutura sofre os efeitos de todos os carregamentos solicitantes. Porém, um elemento estrutural construído posteriormente somente é afetado por carregamentos colocados na estrutura após a sua construção. Mesmo princípio vale para os deslocamentos.

O modelo 2 também foi analisado ativando-se nas configurações do *software* TQS V19 a análise sequencial construtiva por meio do módulo efeito incremental. A partir da versão 17 dos Sistemas CAD/TQS, é possível considerar o efeito construtivo de uma maneira mais refinada no processamento do pórtico através dessa ferramenta.

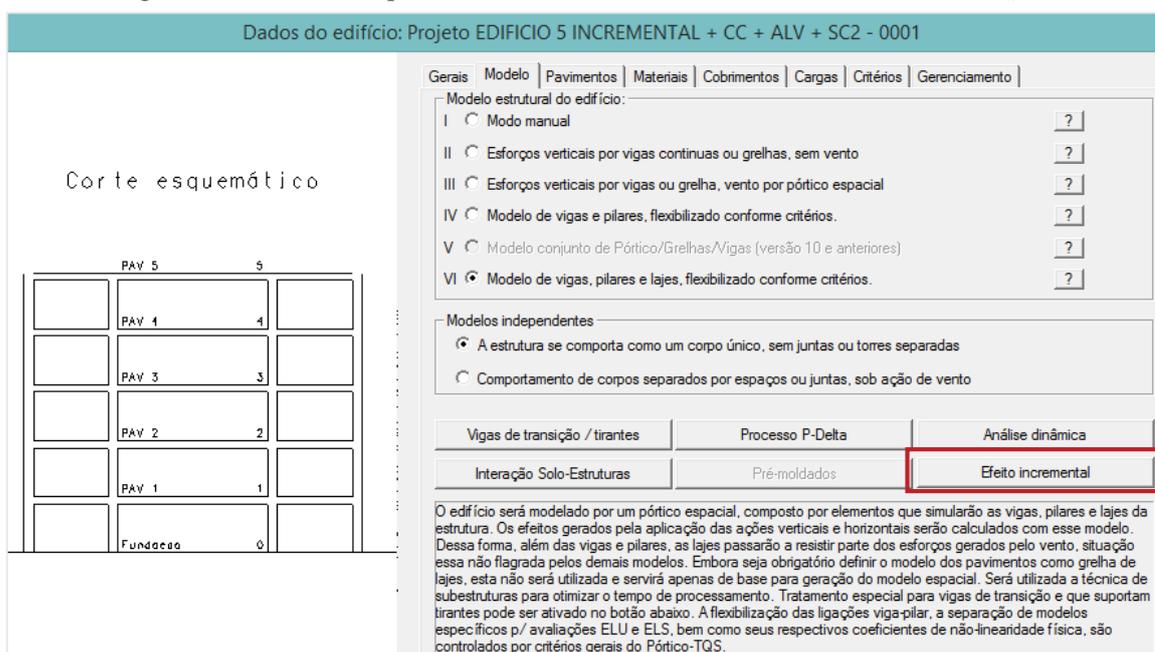
O edifício com cinco pavimentos foi analisado com o módulo ativado.

Na sequência, é explicitado, de forma objetiva e direta, o modo como o módulo do programa utilizado realiza a modelagem de estágios de construção. Sua apresentação tem importância para o entendimento dos pressupostos adotados pelo *software*.

A utilização do módulo facilita as análises em razão de que a estrutura necessita ser lançada uma única vez.

Para sua utilização, é necessário ativar, primeiramente, dentro do modelo, a análise por efeito incremental (Figura 15).

Figura 15 – Análise sequencial construtiva (módulo efeito incremental – TQS).



Fonte: TQS V19 com dados da pesquisa.

Posteriormente, é feita a definição do histórico de carregamento, conforme pode ser observado na Figura 16, determinando qual a parcela de carregamento que atua em cada fase. A soma das parcelas de carga, em cada caso, deve ser sempre 100%.

Na planta de formas, é lançado o carregamento total em todos os pavimentos, sendo que essa a configuração de parcelas que define o momento em que cada carga atuará na análise. A análise pelo módulo efeito incremental considera a aplicação progressiva dos carregamentos verticais, nivelando-se os pisos após a aplicação do carregamento.

Figura 16 – Definição das parcelas e etapas de carga (módulo efeito incremental – TQS).

Definição de Parcelas e etapas de carga

Histórico de Carregamento | Curva E x Tempo

Explicação
Nesta área são definidos os critérios que controlam o histórico de carregamento e o número de fases construtivas a serem analisadas.

Critérios
Número de pavimentos construídos ao mesmo tempo:
Número de dias que representam uma fase construtiva:

Histórico de Carregamentos:

Caso de carregamento	Parcela(%)	Fase
Peso Próprio	100	0
	0	Final
	0	0
	0	1
Cargas permanentes	0	1
	0	2
	0	1
	100	2
Cargas acidentais	0	Final
	50	0
	50	Final

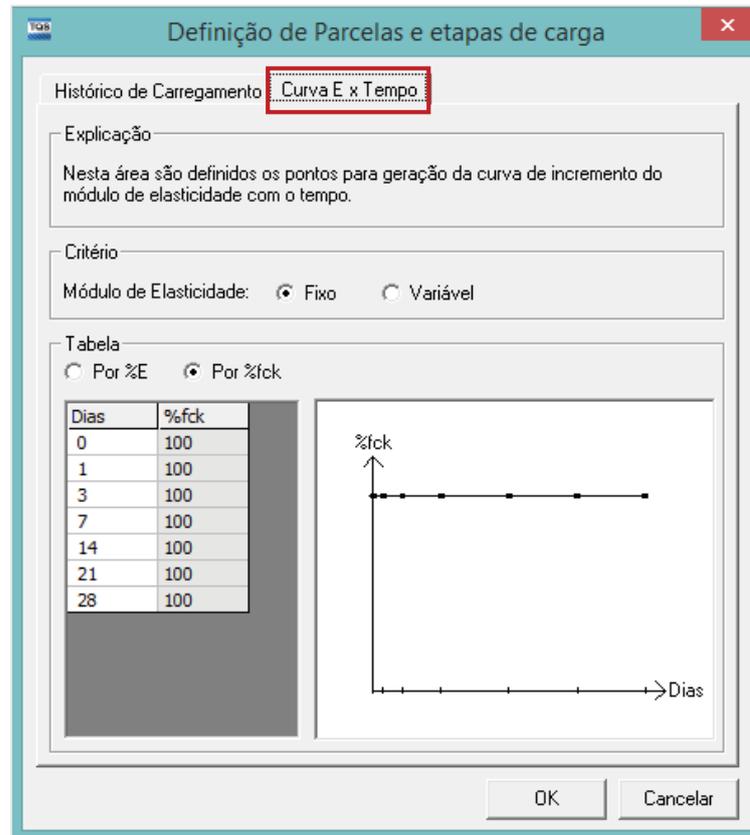
OK Cancelar

Fonte: TQS V19 com dados da pesquisa.

Na aba “Curva E x Tempo” (Figura 17), é definida a variação do módulo de elasticidade com o tempo. Os valores da curva são definidos por uma porcentagem do módulo de elasticidade ou do fck final. Para essa análise, foi adotado o fck fixo (25 MPa).

Foi realizada também uma análise para verificar a influência da variação do fck com o tempo, estando tal análise contemplada no item “e” nas comparações realizadas para essa estrutura.

Figura 17 – Definição da variação do fck com o tempo (módulo efeito incremental – TQS).



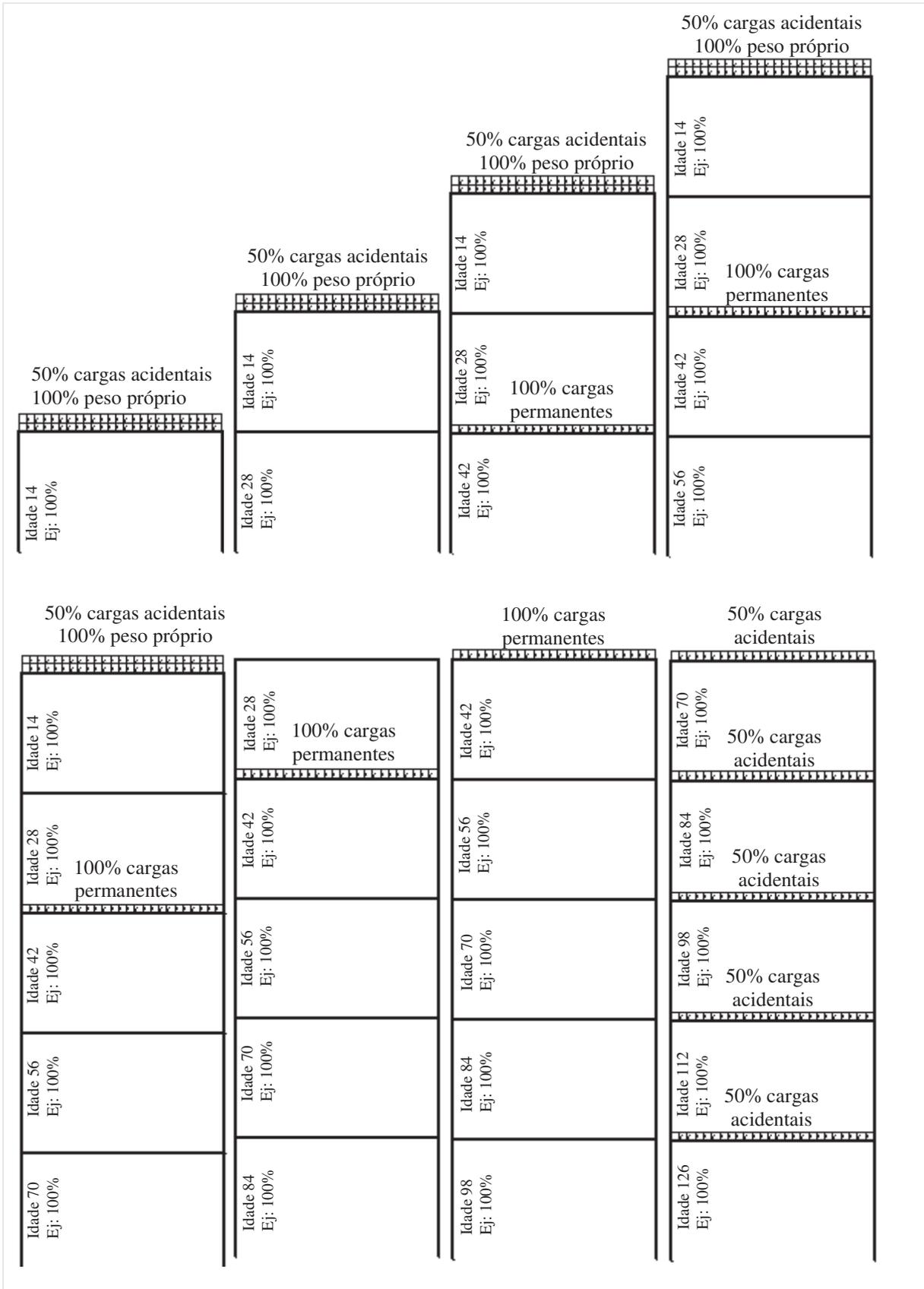
Fonte: TQS V19 com dados da pesquisa.

Após a edição dos critérios de projeto, é gerado dentro da pasta “Espacial” do edifício um desenho esquemático que apresenta as diversas fases construtivas pelas quais a estrutura irá passar. Esses esquemas representam como a análise estrutural foi processada.

De forma breve, a configuração de cargas definidas na Figura 16 indica que o peso próprio, bem como 50% da carga acidental (carga de construção de 2kN/m²), atua a cada nível de pavimento construído. Quando é construído o terceiro pavimento, inicia-se toda a alvenaria no primeiro pavimento, ou seja, 100 % do carregamento permanente (carga de 10 kN/m), e assim segue a analogia para os demais pavimentos. No momento em que toda a estrutura está concluída, atuam os 50% restantes da carga acidental (carga de ocupação de 2 kN/m² em todos os pavimentos).

Para efeito elucidativo, a Figura 18 mostra o esquema gerado pelo *software*, que evidencia que o carregamento é o mesmo definido anteriormente (etapa por etapa), porém, aqui, por meio de porcentagens.

Figura 18 – Esquema do histórico de carregamento na estrutura (módulo efeito incremental – TQS).



Fonte: TQS V19 com dados da pesquisa.

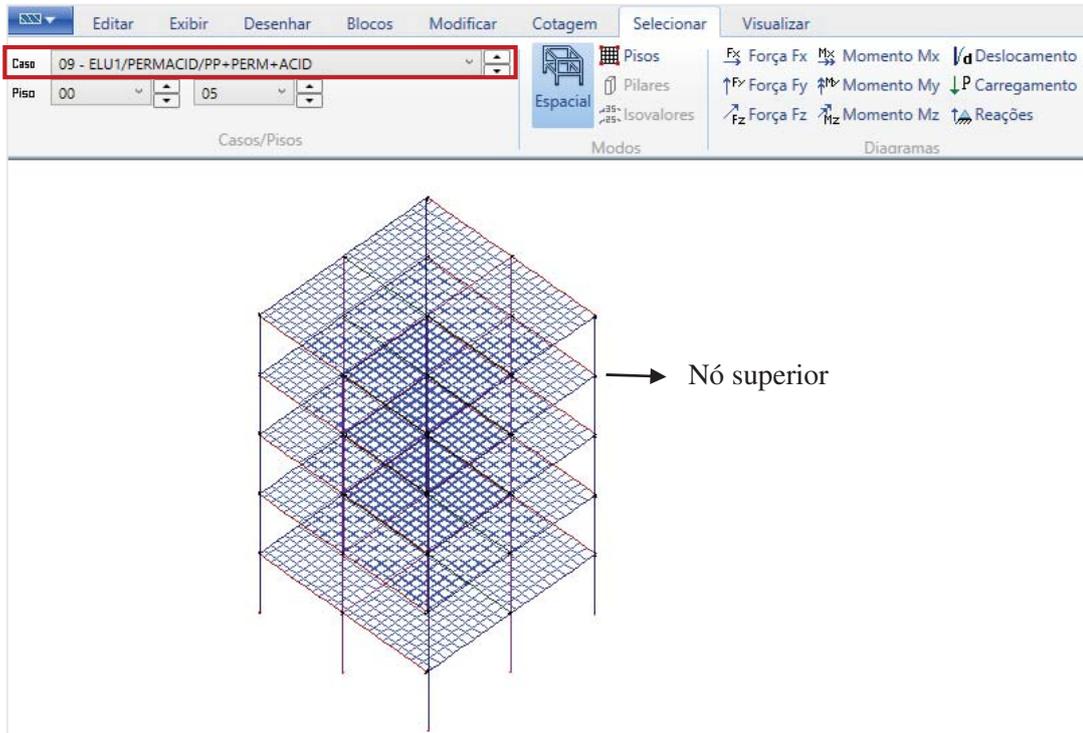
4.2.3 Considerações

Para ambos os modelos, é importante tecer as seguintes considerações:

- a) Não foram consideradas as cargas laterais devido ao vento. A não consideração dessas cargas se deve ao fato de que a força do vento é calculada a partir de uma dada velocidade que pode ser excedida em média uma vez a cada 50 anos (ABNT NBR 6123, 1988). Em função disso, segundo Kripka (1990), apesar de o vento atuar sobre a estrutura desde o início da construção, a probabilidade de que seu efeito seja significativo durante as etapas de construção é reduzida, de modo que a não consideração de sua ação durante essas etapas parece ser um procedimento aceitável, segundo o autor. A própria Norma Brasileira ABNT NBR 6118 (2014) sugere uma redução do fator estatístico S_3 para o cálculo do efeito do vento em estruturas parcialmente executadas, o que representa uma redução no valor da pressão dinâmica. Como a força a aplicar está diretamente relacionada com a altura da edificação, ela sofreria substancial redução em seu valor para uma etapa intermediária qualquer também devido a esse fato. Portanto, para que a força devida ao vento pudesse ser corretamente considerada para as etapas de construção, seu valor deveria ser recalculado para cada etapa em cada um dos andares já construídos, o que implicaria um considerável trabalho adicional para o projetista, além do grau de incerteza envolvido em tal procedimento (KRIPKA, 1990).
- b) Não foi abordada a questão da estabilidade lateral do edifício.
- c) Foi utilizada a combinação última normal, para garantir uma comparação direta entre os dois modelos.
- d) No que se refere especificamente à análise sequencial construtiva, não foi simulado o efeito do escoramento.

Para fins de comparação entre os modelos, foi utilizado o visualizador de pórticos no Estado Limite Último (ELU) e o caso de combinação 09. Essa combinação considera as cargas de peso próprio, permanentes e acidentais, sem majoração ou minoração dos carregamentos, conforme Figura 19.

Figura 19 – Pórtico espacial (combinação 9).



Fonte: TQS V19 com dados da pesquisa.

4.2.4 Comparações realizadas e resultados obtidos

Nesse item, analisaram-se as seguintes grandezas:

- Reações de apoio verticais nas fundações dos 9 pilares.
- Deslocamentos diferenciais verticais (encurtamentos axiais diferenciais) entre os pilares P2 e P5 do pórtico central.
- Esforços axiais nos pilares P2 e P5.
- Momentos fletores na viga V5.
- Influência da variação da resistência do concreto ao longo do tempo.

a) Reações de apoio verticais nas fundações

Obtiveram-se os valores das reações de apoio verticais nas fundações dos nove pilares para os modelos de análise convencional e sequencial construtivo. Os valores finais obtidos são mostrados na Tabela 3, na qual são também apresentadas as diferenças percentuais das reações de apoio verticais (Dif %) entre os dois modelos. Na Tabela, diferenças percentuais positivas indicam acréscimo nas reações obtidas pela análise sequencial construtiva.

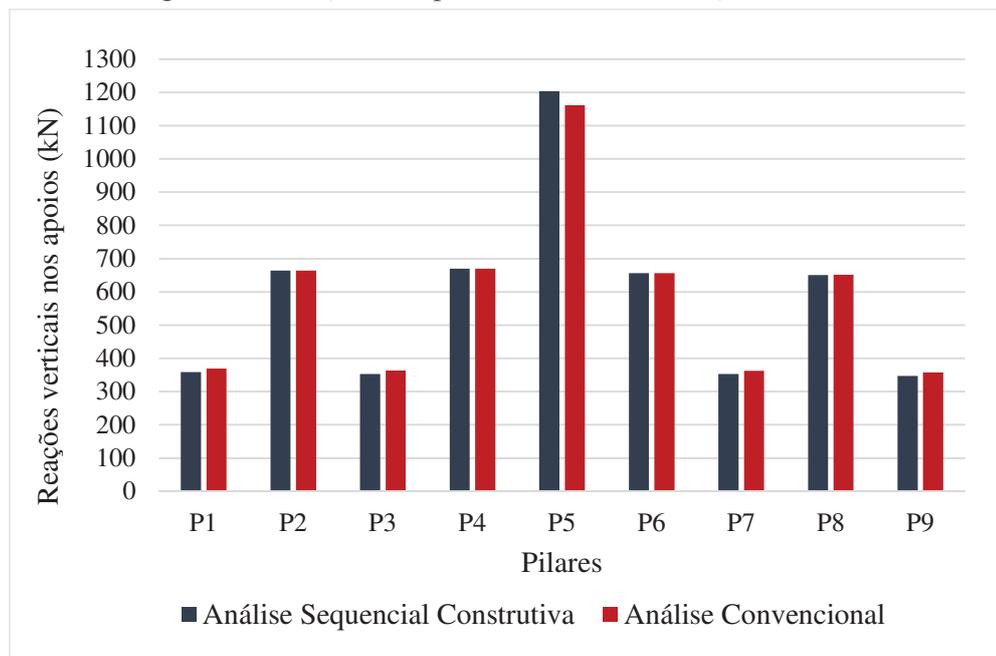
Tabela 3 – Reações de apoio verticais nas fundações (em kN).

Pilar	Análise convencional	Análise sequencial construtiva	Dif (%)
P1	369,09	358,52	- 2,86
P2	664,02	663,76	- 0,04
P3	363,50	353,17	- 2,84
P4	670,25	670,33	0,01
P5	1161,36	1203,99	3,67
P6	656,64	656,26	-0,06
P7	363,10	352,79	-2,84
P8	651,19	650,41	-0,12
P9	357,52	347,43	-2,82
Total	5256,67	5256,66	0,00

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 20 permite visualizar essas diferenças.

Figura 20 – Reações de apoio verticais nas fundações (em kN).



Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando os valores da Tabela 3 e do gráfico mostrado na Figura 20, verifica-se uma diferença maior nas reações de apoio dos pilares de centro e de extremidade. De forma geral, as diferenças não foram significativas.

b) Deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P2 e P5

Os valores finais dos deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares 2 e 5 (medidos nos nós superiores) ao longo dos cinco pavimentos, foram obtidos para os modelos convencional e sequencial construtivo. Os valores finais são mostrados na Tabela 4, na qual são também apresentadas as diferenças percentuais (Dif %) entre os dois modelos.

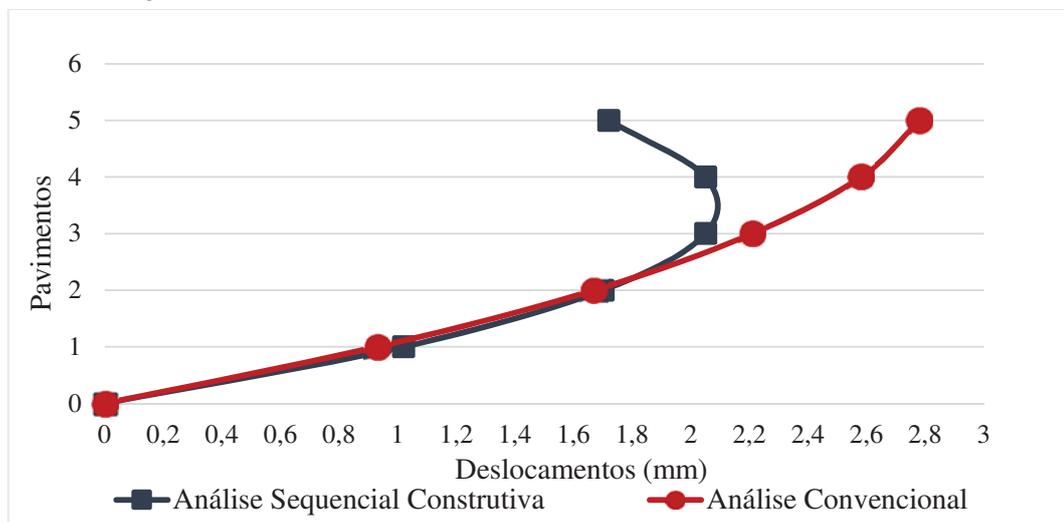
Tabela 4 – Deslocamentos diferenciais verticais P2-P5 (em mm).

Pavimento	Análise convencional	Análise sequencial construtiva	Dif (%)
1	0,93	1,02	9,67
2	1,67	1,70	1,79
3	2,21	2,05	-7,23
4	2,58	2,05	-20,54
5	2,78	1,72	-38,12

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 21 permite visualizar essas diferenças.

Figura 21 – Deslocamentos diferenciais verticais entre P2-P5 (em mm).



Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando a Tabela 4 e o gráfico mostrado na Figura 21, verifica-se que:

- No modelo convencional, os deslocamentos diferenciais crescem do 1º até o 5º andar, onde atinge seu valor máximo.
- No modelo sequencial construtivo, os deslocamentos diferenciais crescem do 1º até o 3º andar (meia altura da edificação), onde atinge seu valor máximo; a partir desse ponto, os deslocamentos diferenciais diminuem.

- Existem diferenças percentuais em todos os andares, estando as maiores nos dois últimos andares, chamado a atenção para o quinto pavimento, onde essa diferença chegou a 38,12%.

c) Esforços axiais nos pilares P2 e P5

Os valores obtidos para a análise sequencial construtiva foram aqui comparados com os valores encontrados pelo módulo efeito incremental do *software* TQS V19. A Tabela 5 mostra como foi possível fazer essa comparação, tomando-se por exemplo os esforços axiais do pilar 5. Primeiramente, foram lançadas as cinco estruturas (etapa por etapa), conforme descrito no modelo 2; posteriormente, foi lançada uma única estrutura de cinco pavimentos com o módulo ativado.

Nas colunas 1, 2, 3, 4 e 5, tem-se as estruturas lançadas, enquanto nas linhas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8, os carregamentos (etapas) de construção. Por exemplo, na linha equivalente à etapa 1, existe apenas uma estrutura, ou seja, apenas se tem o valor do esforço axial naquele pavimento; para os demais, o valor do esforço axial é nulo, pois a estrutura ainda não existe.

Ao se analisar por exemplo a etapa 4, na qual existem quatro pavimentos, observa-se que os esforços desse pavimento não são afetados pelos anteriores. Assim, apenas os carregamentos postos a partir da etapa 4 passam a afetar os esforços no 4º pavimento (ou seja, o esforço final é obtido pela soma das etapas 4, 5, 6, 7 e 8). Na penúltima linha da Tabela 5 (total), apresenta-se a soma das contribuições obtidas para os esforços no elemento. Observa-se que a soma de todos os carregamentos resulta no carregamento final da estrutura.

Tabela 5 – Esforços axiais no pilar P5 em kN (análise sequencial construtiva versus módulo efeito incremental).

Estruturas	1	2	3	4	5	
1	118,55	0	0	0	0	
2	118,67	117,98	0	0	0	
3	207,28	114,79	116,93	0	0	
4	200,65	203,40	112,23	115,84	0	
Carregamentos (etapas)	5	194,53	195,81	199,91	110,01	114,88
	6	85,75	86,18	86,88	89,35	2,87
	7	88,92	89,37	90,31	91,52	95,00
	8	190,83	150,47	112,38	75,32	33,79
Total (sequencial construtiva)	1205,18	958	718,64	482,04	246,54	
Sequencial construtiva (módulo efeito incremental - TQS)	1205,18	958	718,64	482,04	246,54	

Fonte: Elaborado pela autora.

Esses valores são os resultados finais que serviram de base para a análise sequencial construtiva. Ao se comparar os resultados obtidos para a análise sequencial construtiva com os obtidos por meio da utilização do módulo efeito incremental do *software*, chega-se aos mesmos resultados. Vale ressaltar que todos os resultados (esforços solicitantes e deslocamentos) apresentados pelo *software* quando ativado o módulo representam apenas o resultado final da análise, ou seja, não é possível acessar os resultados intermediários de uma determinada etapa construtiva. Somente é possível ter acesso a esses esforços em uma determinada etapa se a análise dos pavimentos for realizada separadamente, o que dá a esse processo uma característica mais trabalhosa.

Na sequência, a Tabela 6 e a Tabela 7 apresentam os valores dos esforços axiais ao longo dos cinco pavimentos, obtidos para os dois modelos de análise. São também apresentadas as diferenças percentuais dos esforços axiais (Dif %) entre os dois modelos. Nessas tabelas, diferenças percentuais positivas indicam acréscimo nos esforços axiais obtidos por intermédio da análise sequencial construtiva.

Tabela 6 – Esforços axiais no pilar P5 (em kN).

Pavimento	Análise convencional	Análise sequencial construtiva	Dif (%)
1	1156,86	1205,18	4,18
2	914,55	958	4,75
3	682,93	718,64	5,23
4	455,93	482,04	5,73
5	234,85	246,54	4,98

Fonte: Elaborado pela autora.

Para o pilar 5, houve um acréscimo nos esforços axiais em todos os pavimentos quando realizada a análise sequencial construtiva, conforme pode ser observado na Tabela 6. As diferenças percentuais foram significativas em todos os pavimentos.

Tabela 7 – Esforços axiais no pilar P2 (em kN).

Pavimento	Análise convencional	Análise sequencial construtiva	Dif (%)
1	659,52	659,26	-0,04
2	526,68	526,37	-0,06
3	394,09	393,76	-0,08
4	261,43	261,15	-0,11
5	129,02	128,88	-0,11

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se, pela Tabela 7, que os esforços axiais para o pilar 2 sofreram uma redução em todos os pavimentos quando realizada a análise sequencial construtiva, não apresentando diferenças significativas quando comparados os dois modelos de análise.

d) Momentos fletores na viga V5

A Tabela 8, a Tabela 9 e a Tabela 10 mostram os valores dos momentos fletores para a viga 5 obtidos por intermédio da análise convencional e da análise sequencial construtiva. São apresentadas também as diferenças percentuais desses momentos (Dif %) entre os dois modelos de análise, ao longo dos cinco pavimentos.

Tabela 8 – Momentos fletores negativos na viga V5 sobre o pilar P2 (em kN.m).

Pavimento	Análise Convencional	Análise sequencial construtiva	Dif (%)
1	31,24	28,43	-8,99
2	37,14	32,38	-12,82
3	39,15	33,50	-14,43
4	42,95	34,47	-19,74
5	29,19	24,07	-17,54

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se, na Tabela 8, que houve uma redução nos momentos fletores em todos os pavimentos obtidos pela análise sequencial construtiva, sendo essa redução mais significativa nos dois últimos pavimentos, de ordem superior a 15%.

Tabela 9 – Momentos fletores negativos na viga V5 sobre o pilar P5 (em kN.m).

Pavimento	Análise convencional	Análise sequencial construtiva	Dif (%)
1	43,96	45,06	2,50
2	38,33	40,59	5,90
3	35,31	38,72	9,66
4	32,08	38,24	19,20
5	38,12	44,62	17,05

Fonte: Elaborado pela autora.

Os dados que compõem a Tabela 9 evidenciam que ocorreu um acréscimo nos momentos fletores em todos os pavimentos, obtidos pela análise sequencial construtiva quando comparada com a análise convencional, sendo a diferença mais expressiva nos últimos dois pavimentos.

Tabela 10 – Momentos fletores positivos na V5 (em kN.m).

Pavimento	Análise convencional	Análise sequencial construtiva	Dif (%)
1	27,47	28,38	3,31
2	27,03	28,39	5,03
3	27,36	28,66	4,75
4	26,97	28,39	5,27
5	31,08	30,74	-1,09

Fonte: Elaborado pela autora.

Observando-se a Tabela 10, constata-se que os valores dos momentos fletores positivos obtidos pela análise sequencial construtiva superaram os obtidos pela análise convencional, exceto no último pavimento.

e) Influência da variação da resistência do concreto ao longo do tempo

A variação do tempo de execução por pavimento é importante no sentido de verificar a influência que diferentes ciclos de concretagem têm com a variação das propriedades dos materiais, e, com isso, a resposta da estrutura sob a forma de encurtamentos dos elementos verticais e também esforços nos elementos horizontais.

No projeto de estruturas usuais de edifícios de concreto armado, adota-se uma única resistência para os elementos componentes da estrutura portante, e, conseqüentemente, um único valor para o módulo de elasticidade longitudinal (E).

Indica-se, nos projetos, a resistência característica à compressão - f_{ck} , que, salvo indicação em contrário, refere-se à idade de 28 dias. Esse procedimento revela o fato de que muitos elementos só serão plenamente solicitados após os 28 dias. Porém, deve ser levado em consideração que parte da estrutura recém concretada – e que, portanto, possui resistência inferior à esperada – recebe parte da carga dos andares superiores por meio do escoramento, podendo gerar, com isso, solicitações adicionais que porventura não possam ser absorvidas.

Nesses casos, é importante obter a evolução da resistência à compressão com a idade, o que pode ser feito por meio de ensaios ou, por meio analítico, em caráter orientativo, conforme a expressão seguinte, de acordo com o item 12.3.3 da ABNT NBR 6118 (2014).

$$f_{cd} = \frac{f_{ckj}}{\gamma_c} = \beta_1 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (1)$$

Sendo:

$$\beta_1 = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (2)$$

Onde:

f_{cd} = resistência de cálculo do concreto;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto;

γ_c = coeficiente de minoração da resistência do concreto;

β_1 = coeficiente que depende da idade do concreto e indica a variação da resistência;

s = coeficiente que depende do tipo de cimento;

t = idade efetiva do concreto, expressa em dias.

Sendo que :

$s = 0,38$ para concreto de cimento CPIII e IV;

$s = 0,25$ para concreto de cimento CPI e II;

$s = 0,20$ para concreto de cimento CPV-ARI.

A título de comparação, são apresentados, na Tabela 11, os valores de β_1 (variação da resistência característica do concreto), com o tempo t em dias, conforme a expressão fornecida pela ABNT NBR 6118 (2014) para diferentes tipos de cimento.

Tabela 11 – Variação de β_1 com o tempo t em dias para diferentes tipos de cimento.

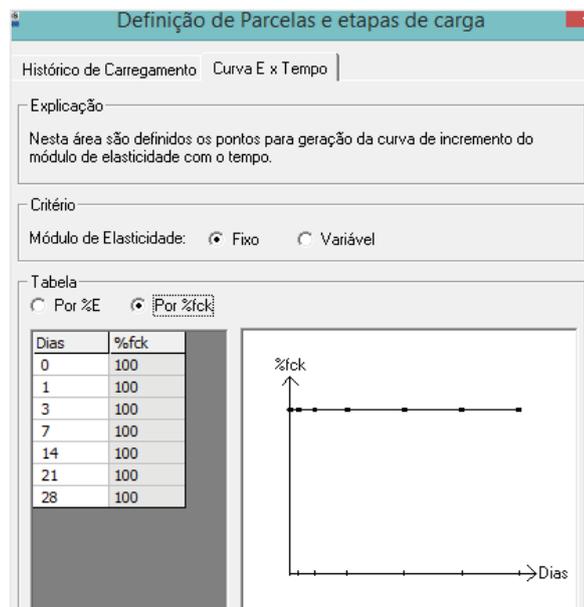
t (dias)	Cimento tipo CPIII e CPIV	Cimento tipo CPI e CPII	Cimento tipo CPV-ARI
1	0,20	0,34	0,42
3	0,46	0,60	0,66
7	0,68	0,78	0,82
14	0,85	0,90	0,92
21	0,94	0,96	0,97
28	1,00	1,00	1,00
90	1,18	1,12	1,09
120	1,22	1,14	1,11
365	1,32	1,20	1,16
730	1,36	1,22	1,17

Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados da ABNT NBR 6118 (2014).

Para verificar a influência da consideração da evolução da resistência do concreto com a idade, foi considerado, para a análise, o pórtico central da estrutura, cujo concreto tem resistência característica à compressão de 25 MPa e adotados os mesmos parâmetros e carregamentos já mencionados. Foi utilizado para a análise o módulo efeito incremental do *software* TQS, que permite traçar a curva de evolução da resistência do concreto de acordo com a idade, e adotado um cimento do tipo CPII.

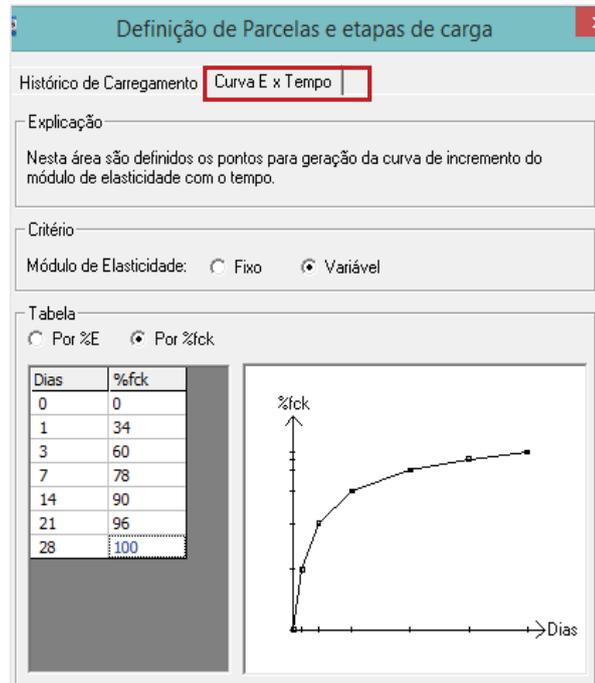
Além disso, foram efetuadas análises para o procedimento sequencial construtivo, considerando tanto o fck constante (28 dias), conforme pode ser observado na Figura 22, quanto para diferentes ciclos de concretagem (3, 7 e 14 dias), o que pode ser visualizado na Figura 23 e na Figura 24.

Figura 22 – fck constante ao longo das etapas de construção (28 dias).



Fonte: TQS V19 com dados da pesquisa.

Figura 23 – fck variável ao longo das etapas de construção.



Fonte: TQS V19 com dados da pesquisa.

Figura 24 – Simulação dos dias que representam uma fase construtiva – ciclo de concretagem (3, 7 e 14).

Definição de Parcelas e etapas de carga

Histórico de Carregamento: Curva E x Tempo

Explicação:
Nesta área são definidos os critérios que controlam o histórico de carregamento e o número de fases construtivas a serem analisadas.

Critérios:
Número de pavimentos construídos ao mesmo tempo: 1
Número de dias que representam uma fase construtiva: 3

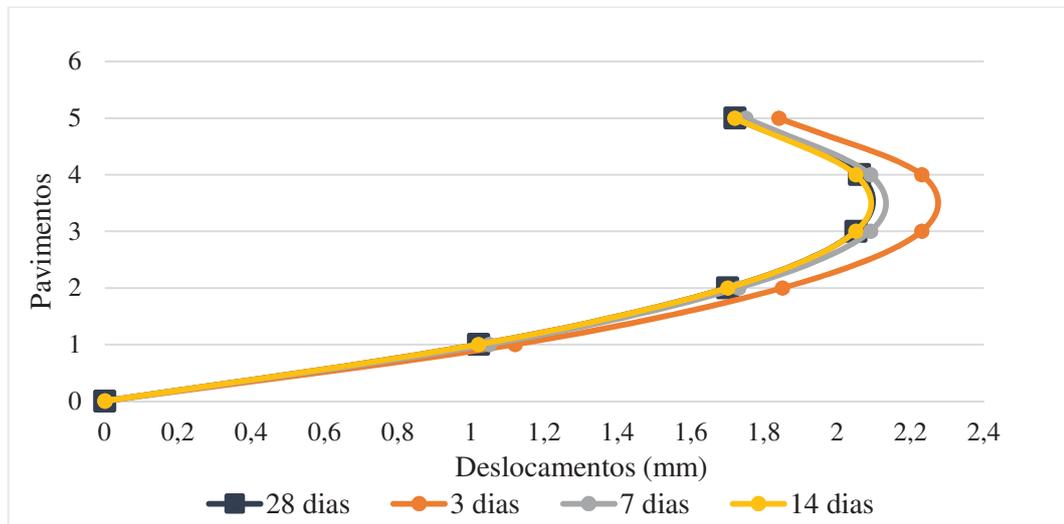
Histórico de Carregamentos:

Caso de carregamento	Parcela(%)	Fase
Todas permanentes e acidentais dos pavimentos	0	0
	100	Final
Peso Próprio	100	0
	0	Final
	0	0
	0	1
	0	1
Cargas permanentes	0	2
	0	1
	100	2
	0	Final
	0	Final

Fonte: TQS V19 com dados da pesquisa.

A Figura 25 e a Tabela 12 apresentam os valores de deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares 2 e 5, considerando o ciclo de concretagem de 28 dias (fck fixo) e diferentes ciclos de concretagem (3, 7 e 14 dias), com o fck variável.

Figura 25 – Deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares 2 e 5 ao longo da altura da edificação.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 12 – Deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P5 e P2 (em mm).

Pavimento	3 dias	7 dias	14 dias	fck fixo (28 dias)
1	1,12	1,05	1,02	1,02
2	1,85	1,73	1,70	1,70
3	2,23	2,09	2,05	2,05
4	2,23	2,09	2,05	2,06
5	1,84	1,75	1,72	1,72

Fonte: Elaborado pela autora.

Verifica-se, no que toca a encurtamentos axiais diferenciais, que a adoção de menores tempos de execução traduz-se em maiores encurtamentos. O comportamento quanto aos deslocamentos diferenciais verticais (encurtamentos axiais diferenciais) foi comparado com um estudo realizado por Rocha (2016). Os resultados e conclusões foram equivalentes aos obtidos pelo autor.

Foram comparados também valores de momentos fletores na viga 5 para o fck constante e equivalente aos 28 dias, e para ciclos de concretagem de 7 e 14 dias. A Tabela 13 ilustra os momentos fletores obtidos para as considerações descritas.

Tabela 13 – Momentos fletores negativos na viga V5 sobre o pilar P2 (em kN.m).

Pavimento	7 dias	14 dias	Fck fixo (28 dias)
1	28,42	28,45	28,43
2	32,31	32,40	32,38
3	33,33	33,49	33,50
4	34,23	34,43	34,47
5	23,88	24,01	24,07

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos mostraram que a variação nos esforços para cada um dos ciclos aplicados pode ser considerada desprezível. Cabe ainda a observação de que, além de apresentarem pouca diferença entre si, as análises efetuadas considerando-se os diferentes ciclos de concretagem resultam em valores praticamente idênticos aos obtidos pela análise sequencial construtiva sem a consideração da reologia. Os resultados aqui obtidos correspondem com as conclusões apontadas por Kripka e El Debs (1995).

4.3 Estrutura 3

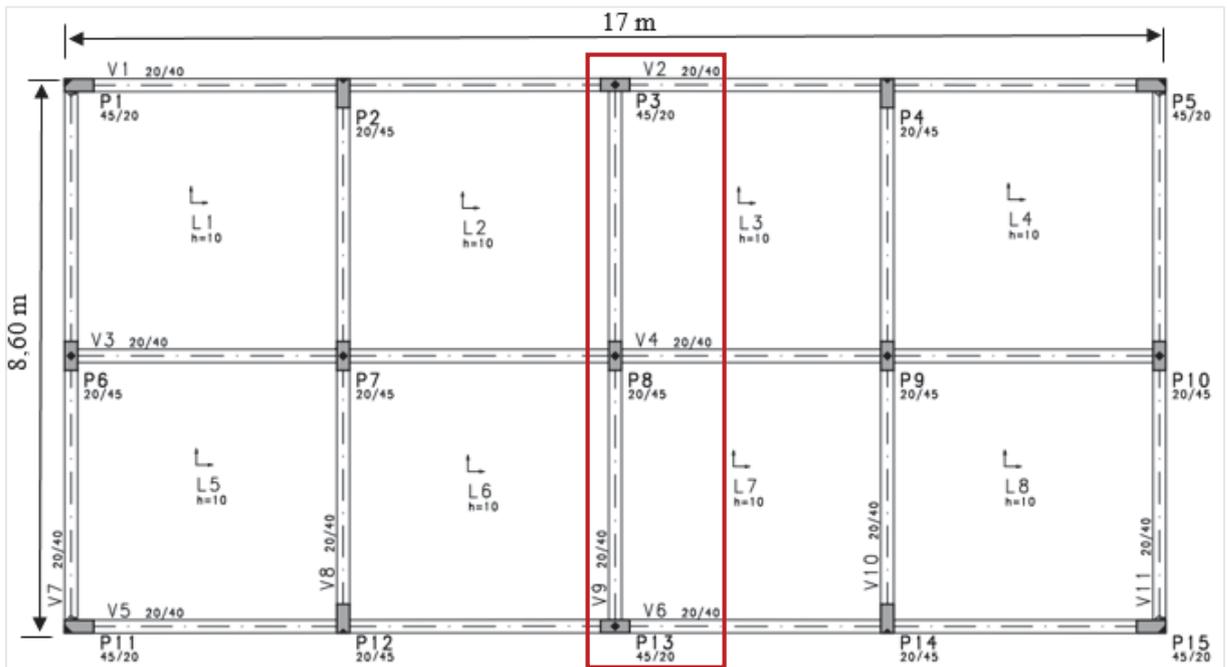
4.3.1 Características da estrutura analisada

A estrutura 3 trata-se também de um edifício comercial (escritórios) de andares múltiplos, diferindo-se da anterior pelas seguintes características:

- a) A estrutura é composta por 12 pavimentos.
- b) A estrutura tem dimensões em planta de 17 m x 8,60 m.
- c) Seis dos pilares têm seção de 45 cm x 20 cm e o restante tem seção de 20 cm x 45 cm ao longo de toda a altura do edifício.

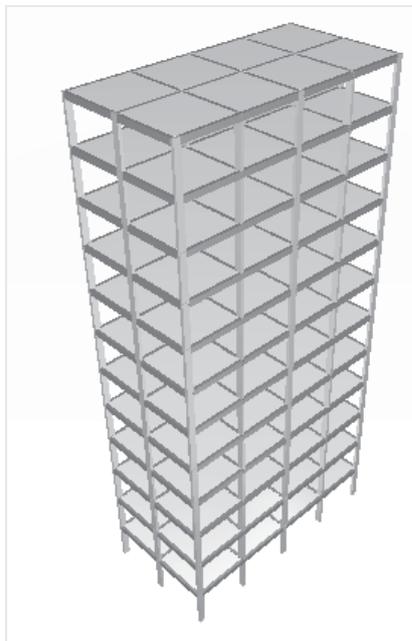
A Figura 26 e a Figura 27 apresentam a planta de formas da edificação e sua representação tridimensional, respectivamente.

Figura 26 – Planta de formas da edificação.



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

Figura 27 – Representação tridimensional da estrutura.



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

4.3.2 Modelos e carregamentos

Para a estrutura 3, foram criados também dois modelos de análise, um denominado de convencional e o outro de sequencial construtivo. No modelo convencional, o carregamento atua simultaneamente em todos os pavimentos, após a estrutura estar concluída.

A estrutura 3 está sujeita ao mesmo carregamento detalhado na estrutura 2, que segue:

- P_{Pi}: Peso próprio no andar i.
- C_{Ci}: Carga de construção no andar i (2 kN/m² atuando nas lajes).
- ALV_i/REV_i: Carga de alvenaria e revestimento no andar i (10 kN/m atuando em todas as vigas).
- S_{Ci}: Carga de ocupação ou sobrecarga no andar i (2 kN/m² atuando nas lajes).

No modelo sequencial construtivo, foram lançadas 12 etapas distintas sujeitas a 15 carregamentos.

O Quadro 4 apresenta um resumo das etapas e dos carregamentos do modelo sequencial construtivo.

Neste exemplo foram omitidas as figuras correspondentes às etapas e aos carregamentos 1 a 15, devido à analogia existente com o exemplo anterior.

Quadro 4 – Resumo das etapas e carregamentos do modelo sequencial construtivo.

Etapas	Carregamento	Descrição do carregamento
1	1	PP ₁ + CC ₁
2	2	PP ₂ + CC ₂
3	3	PP ₃ + CC ₃ + ALV ₁ /REV ₁
4	4	PP ₄ + CC ₄ + ALV ₂ /REV ₂
5	5	PP ₅ + CC ₅ + ALV ₃ /REV ₃
6	6	PP ₆ + CC ₆ + ALV ₄ /REV ₄
7	7	PP ₇ + CC ₇ + ALV ₅ /REV ₅
8	8	PP ₈ + CC ₈ + ALV ₆ /REV ₆
9	9	PP ₉ + CC ₉ + ALV ₇ /REV ₇
10	10	PP ₁₀ + CC ₁₀ + ALV ₈ /REV ₈
11	11	PP ₁₁ + CC ₁₁ + ALV ₉ /REV ₉
12	12	PP ₁₂ + CC ₁₂ + ALV ₁₀ /REV ₁₀
	13	ALV ₁₁ /REV ₁₁
	14	ALV ₁₂ /REV ₁₂
	15	SC ₁ a SC ₁₂

Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.3 Considerações

Para a análise dessa estrutura, adotou-se as mesmas considerações já detalhados em 4.2.3.

4.3.4 Comparações realizadas e resultados obtidos

Nesse momento, analisaram-se os seguintes itens:

- a) Deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P3 e P8 do pórtico central indicado na planta de formas.
- b) Importância do histórico de esforços da estrutura.

a) Deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P3 e P8

Os valores finais dos deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares 3 e 8 (medidos no nó superior) ao longo dos 12 pavimentos foram obtidos para os modelos convencional e sequencial construtivo. Os valores finais são mostrados na Tabela 14, na qual são também apresentadas as diferenças percentuais (Dif %) entre os dois modelos.

Tabela 14 – Deslocamentos diferenciais verticais P3-P8 (em mm).

Pavimento	Análise convencional	Análise sequencial construtiva	Dif (%)
1	1,05	1,23	17,14
2	1,97	2,25	14,21
3	2,78	3,09	11,15
4	3,5	3,72	6,28
5	4,11	4,17	1,45
6	4,64	4,42	-4,74
7	5,09	4,51	-11,39
8	5,45	4,44	-18,53
9	5,75	4,21	-26,78
10	5,97	3,84	-35,67
11	6,13	3,32	-45,84
12	6,21	2,66	-57,16

Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando a Tabela 14, observa-se que as diferenças nos deslocamentos diferenciais verticais são maiores nos últimos pavimentos da edificação, o que já havia sido constatado para os demais casos. Quando as diferenças são comparadas com as obtidas na estrutura 2, verifica-se que, com o aumento da altura da edificação, ocorre também um aumento nessas diferenças (Dif %). Enquanto no último pavimento da estrutura 2 (estrutura de cinco pavimentos) a

diferença girava em torno de 38%, para a estrutura 3 (12 pavimentos), essa diferença gira em torno de 57%, evidenciando que a altura da edificação influencia nos resultados, tornando-os mais expressivos.

b) Importância do histórico de esforços da estrutura

O modelo de cálculo por etapas de construção permite que se tenha um histórico de esforços a partir do momento em que o elemento é colocado na estrutura e carregado pela primeira vez. Esse histórico permite verificar em que etapa de construção e carregamento o elemento é mais solicitado e quais os valores dos esforços que atuam sobre o elemento naquele instante. O módulo incremental do *software* TQS não permite acesso a esses dados, uma vez que fornece apenas o resultado final da análise e não de cada uma das etapas, conforme já havia sido mencionado. Nesse item, estão apresentados os históricos de esforços obtidos, por exemplo, para o momento fletor na viga V9 sobre o pilar P8, no primeiro andar e o momento fletor no topo do pilar P13 também para o primeiro pavimento.

Obtiveram-se os valores dos momentos fletores, para o primeiro andar, ao longo dos 15 carregamentos, conforme mostra a Tabela 15.

Como se observou, qualquer elemento no 1º pavimento é solicitado pelos 15 carregamentos.

Tabela 15 – Momentos fletores na viga V9 sobre o pilar P8 no 1º pavimento.

Etapa	Carregamento	Momento (em kN.m)
1	1	-26,51
2	2	1,20
3	3	-17,04
4	4	0,99
5	5	0,50
6	6	0,53
7	7	0,49
8	8	0,46
9	9	0,43
10	10	0,39
11	11	0,36
12	12	0,33
-	13	0,10
-	14	0,11
-	15	-8,31
Total		-45,97

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 15, pode-se observar as variações sofridas pelos momentos fletores ao longo dos carregamentos. Percebe-se, por exemplo, que o valor do momento fletor para o carregamento final (carregamento 15) é menor do que o valor obtido para o carregamento 1 e 3. Ou seja, nota-se que a viga é mais solicitada pelos momentos fletores que ocorrem durante essas etapas de construção.

A grande vantagem do histórico de carregamentos é que ele consegue detectar variações de esforços ao longo da construção. O mesmo princípio vale também para esforços cortantes, axiais, entre outros.

Deve-se atentar para o fato de que ocorreu uma inversão dos esforços ao longo das etapas de construção, revelando-se a importância de uma investigação das etapas intermediárias de construção e carregamento.

Foram obtidos também os valores dos momentos fletores no topo do pilar 13 para o primeiro pavimento. Análogo ao caso anterior, o valor final é obtido pela soma dos 15 carregamentos, conforme pode ser observado na Tabela 16.

Tabela 16 – Momentos fletores no topo do pilar P13 no 1º pavimento.

Etapa	Carregamento	Momento (em kN.m)
1	1	6,25
2	2	-0,59
3	3	3,38
4	4	-0,22
5	5	0,18
6	6	0,12
7	7	0,12
8	8	0,11
9	9	0,11
10	10	0,10
11	11	0,09
12	12	0,08
-	13	0,02
-	14	0,03
-	15	2,00
Total		11,78

Fonte: Elaborado pela autora.

No caso do pilar P13, da mesma forma que ocorreu para a viga, observa-se também a inversão de esforços ocorrida ao longo das etapas de carregamento, ratificando mais uma vez a importância da investigação das etapas intermediárias.

4.4 Estrutura 4

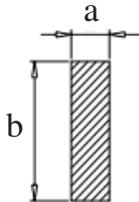
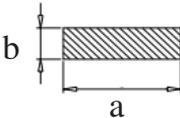
4.4.1 Características da estrutura analisada

A estrutura 4 apresenta as mesmas características da estrutura 3, tendo como diferenças os seguintes aspectos:

- Composta por 20 pavimentos.
- Os pilares apresentam variação de seção ao longo da altura da edificação (Quadro 5).
- As 11 vigas têm a mesma seção de 20 cm x 45 cm, em todos os pavimentos.
- Estrutura de concreto armado com resistência característica à compressão de 40 MPa.

A planta de formas aqui utilizada foi a mesma empregada na estrutura 3, apenas variando as dimensões de vigas e pilares, conforme já comentado.

Quadro 5 – Seções dos pilares ao longo da altura da edificação.

Andar				
	a (cm)	b (cm)	a (cm)	b (cm)
	P2, P4, P6, P7, P8, P9, P10, P12 e P14		P1, P3, P5, P11, P13 e P15	
1° ao 5°	25	110	110	25
6° ao 10°	25	80	80	25
11° ao 15°	25	60	60	25
16° ao 20°	25	40	40	25

Fonte: Elaborado pela autora.

4.4.2 Modelos e carregamentos

Assim como nas demais estruturas, para a estrutura 4, foram utilizados, também para fins de comparação, o modelo convencional e o modelo sequencial construtivo. Aqui, o modelo sequencial construtivo foi calculado pelo módulo efeito incremental presente no *software* TQS V19 por facilitar o processamento da estrutura e as análises.

Para o modelo convencional desse exemplo, foram empregadas as mesmas cargas dos modelos anteriores, mais a carga de vento, tendo essas cargas sido consideradas atuando simultaneamente em todos os pavimentos após a estrutura construída.

Para isso, foram definidos alguns parâmetros no *software*.

Para a configuração dos parâmetros, considerou-se uma edificação localizada na cidade de Passo Fundo-RS. Em função dessa consideração, foi adotado como velocidade básica do vento o índice de 45m/s obtido do mapa das Isopletas (ABNT NBR 6123, 1988). Como fator do terreno (S1), foi adotado o valor de 1; para categoria de rugosidade (S2), foi adotada a categoria IV; para a classe da edificação, foi adotada a classe C (devido à altura de 60 m); e, como fator estatístico (S3), foi adotado valor igual a 1.

O coeficiente de arrasto foi calculado automaticamente por meio da entrada de dados da edificação, que são as dimensões L1 (8,60 m), L2 (17 m) e sua altura (60 m). Considerou-se um vento de baixa turbulência, o que resultou em um coeficiente de arrasto igual a 1,09.

O Quadro 6 apresenta o esquema dos carregamentos configurados para a análise.

Quadro 6 – Resumo dos esquemas e carregamentos do modelo sequencial construtivo.

Esquema	Carregamento	Descrição do carregamento
1	1	PP ₁ + CC ₁
2	2	PP ₂ + CC ₂
3	3	PP ₃ + CC ₃ + ALV ₁ /REV ₁
4	4	PP ₄ + CC ₄ + ALV ₂ /REV ₂
5	5	PP ₅ + CC ₅ + ALV ₃ /REV ₃
6	6	PP ₆ + CC ₆ + ALV ₄ /REV ₄
7	7	PP ₇ + CC ₇ + ALV ₅ /REV ₅
8	8	PP ₈ + CC ₈ + ALV ₆ /REV ₆
9	9	PP ₉ + CC ₉ + ALV ₇ /REV ₇
10	10	PP ₁₀ + CC ₁₀ + ALV ₈ /REV ₈
11	11	PP ₁₁ + CC ₁₁ + ALV ₉ /REV ₉
12	12	PP ₁₂ + CC ₁₂ + ALV ₁₀ /REV ₁₀
13	13	PP ₁₃ + CC ₁₃ + ALV ₁₁ /REV ₁₁
14	14	PP ₁₄ + CC ₁₄ + ALV ₁₂ /REV ₁₂
15	15	PP ₁₅ + CC ₁₄ + ALV ₁₃ /REV ₁₃
16	16	PP ₁₆ + CC ₁₆ + ALV ₁₄ /REV ₁₄
17	17	PP ₁₇ + CC ₁₇ + ALV ₁₅ /REV ₁₅
18	18	PP ₁₈ + CC ₁₈ + ALV ₁₆ /REV ₁₆
19	19	PP ₁₉ + CC ₁₉ + ALV ₁₇ /REV ₁₇
20	20	PP ₂₀ + CC ₂₀ + ALV ₁₈ /REV ₁₈
	21	ALV ₁₉ /REV ₁₉
	22	ALV ₂₀ /REV ₂₀
	23	SC ₁ a SC ₂₀ - VENTO ₁ a VENTO ₂₀

Fonte: Elaborado pela autora.

4.4.3 Considerações

Para análise dessa estrutura, foram adotadas as mesmas considerações das estruturas anteriores, tendo, nesse exemplo, sido levada em consideração a carga de vento e a estabilidade lateral da edificação, o que não foi abordado nos demais casos.

4.4.4 Comparações realizadas e resultados obtidos

Para essa estrutura, foram realizadas as seguintes análises:

- a) Deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P3 e P8 do pórtico central.
- b) Diferenças nos momentos fletores da viga V9 para ambos os modelos de análise.
- c) Diferenças nos momentos fletores do pilar P3 para ambos os modelos de análise.
- d) Diferenças entre os modelos em termos de dimensionamento de vigas.
- e) Diferenças entre os modelos em termos de dimensionamento de pilares.
- f) Influência do cronograma construtivo nos esforços.
- g) Influência da variação da carga construtiva nos esforços.

a) Deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P3 e P8

Os valores finais dos deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P3 e P8 ao longo dos 20 pavimentos foram obtidos para os modelos convencional e sequencial construtivo e são mostrados na Tabela 17, na qual são também apresentadas as diferenças percentuais (Dif %) entre os dois modelos.

Tabela 17 – Deslocamentos diferenciais verticais entre P3-P8 (em mm).

Pavimento	Análise convencional	Análise sequencial construtiva	Dif (%)
1	0,41	0,48	17,07
2	0,78	0,91	16,66
3	1,13	1,28	13,27
4	1,44	1,61	11,80
5	1,74	1,88	8,04
6	2,1	2,23	6,19
7	2,43	2,52	3,70
8	2,74	2,75	0,36
9	3,01	2,92	- 2,99
10	3,25	3,04	- 6,46
11	3,55	3,22	- 9,29
12	3,81	3,32	- 12,86
13	4,05	3,36	- 17,03
14	4,27	3,33	- 22,01
15	4,44	3,25	- 26,80
16	4,68	3,22	- 31,19
17	4,86	3,08	- 36,62
18	5,0	2,85	-43,00
19	5,1	2,51	- 50,78
20	5,1	2,05	- 59,80

Fonte: Elaborado pela autora.

Através dos resultados apresentados, foi possível perceber novamente a influência da altura nos deslocamentos diferenciais verticais. Enquanto no último pavimento da estrutura 2 (estrutura de cinco pavimentos) a diferença entre as análises girava em torno de 38%, para a estrutura 3 (estrutura de 12 pavimentos) essa diferença passou para próximo de 57%, e, nesse caso, a diferença praticamente atingiu 60%. Há que se ressaltar que, quanto maior for a altura do edifício, maior será a influência do processo sequencial construtivo nos resultados.

b) Momentos fletores na viga V9

A Tabela 18 e a Tabela 19 apontam as diferenças percentuais dos momentos fletores negativos para a viga V9 (Dif %) entre os dois modelos ao longo dos 20 pavimentos.

Tabela 18 – Momentos fletores negativos na viga V9 sobre o pilar P3 (em kN.m).

Pavimento	Análise convencional	Análise sequencial construtiva	Dif (%)
1	16,98	16,58	-2,35
2	20,12	19,59	-2,63
3	22,29	22,01	-1,25
4	24,61	24,29	-1,30
5	26,05	25,79	-0,99
6	28,96	28,13	-2,86
7	31,19	29,98	-3,87
8	33,01	31,33	-5,08
9	34,92	32,51	-6,90
10	35,63	32,70	-8,22
11	36,59	32,56	-11,01
12	38,36	33,26	-13,29
13	39,62	33,40	-15,69
14	41,18	33,46	-18,74
15	40,45	31,92	-21,08
16	40,30	30,30	-24,81
17	41,64	29,75	-28,55
18	42,17	28,41	-32,62
19	43,58	26,77	-38,57
20	25,69	15,46	-39,82

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 19 – Momentos fletores negativos na viga V9 sobre o pilar P8 (em kN.m).

Pavimento	Análise convencional	Análise sequencial construtiva	Dif (%)
1	41,76	41,39	-0,88
2	37,12	36,39	-1,96
3	33,21	32,10	-3,34
4	29,44	28,29	-3,90
5	26,39	25,34	-3,90
6	27,61	27,06	-1,99
7	24,01	23,99	-0,08
8	20,81	21,57	3,65
9	17,76	19,67	10,75
10	15,53	18,69	20,34
11	16,08	20,64	28,35
12	13,30	19,55	46,99
13	10,97	19,19	74,93
14	8,69	19,32	122,32
15	7,76	20,71	166,88
16	10,28	25,26	145,71
17	8,38	26,48	215,99
18	7,14	28,76	302,80
19	5,79	31,95	451,81
20	13,84	40,42	192,05

Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação aos momentos fletores negativos na viga V9 sobre o pilar P3 (pilar de extremidade), observa-se, pela análise da Tabela 18, que houve uma redução nesses esforços ao longo dos 20 pavimentos, quando realizada a análise sequencial construtiva.

No que se refere aos momentos fletores negativos na viga V9 sobre o pilar P8 (pilar de centro), pelo exame da Tabela 19, constatou-se que ocorreu uma redução até o 7º pavimento quando realizada a análise sequencial construtiva, e que, a partir do 8º pavimento, ocorreu um acréscimo acentuado, chamando atenção para os últimos pavimentos, nos quais as diferenças foram expressivas.

Na Tabela 20, estão apresentados os valores dos momentos fletores positivos para a viga V9, obtidos pela análise convencional e pela análise sequencial construtiva. Nessa tabela, são também apresentadas as diferenças percentuais (Dif %) entre os dois modelos. Na tabela, diferenças percentuais positivas indicam acréscimo nos esforços obtidos pela análise sequencial.

Tabela 20 – Momentos fletores positivos no centro do vão (em kN.m).

Pavimento	Análise convencional	Análise sequencial construtiva	Dif (%)
1	25,47	25,85	1,49
2	25,68	26,28	2,33
3	26,31	26,98	2,54
4	27,02	27,75	2,70
5	27,93	28,57	2,29
6	30,63	31,30	2,18
7	31,33	31,93	1,91
8	32,02	32,46	1,37
9	32,59	32,83	0,73
10	33,37	33,25	-0,35
11	34,89	34,57	-0,91
12	35,61	34,76	-2,38
13	36,36	34,87	-4,09
14	37,02	34,78	-6,05
15	37,87	34,90	-7,84
16	39,47	36,40	-7,77
17	39,99	36,11	-9,70
18	40,46	35,70	-11,76
19	40,64	35,01	-13,85
20	43,88	36,54	-16,72

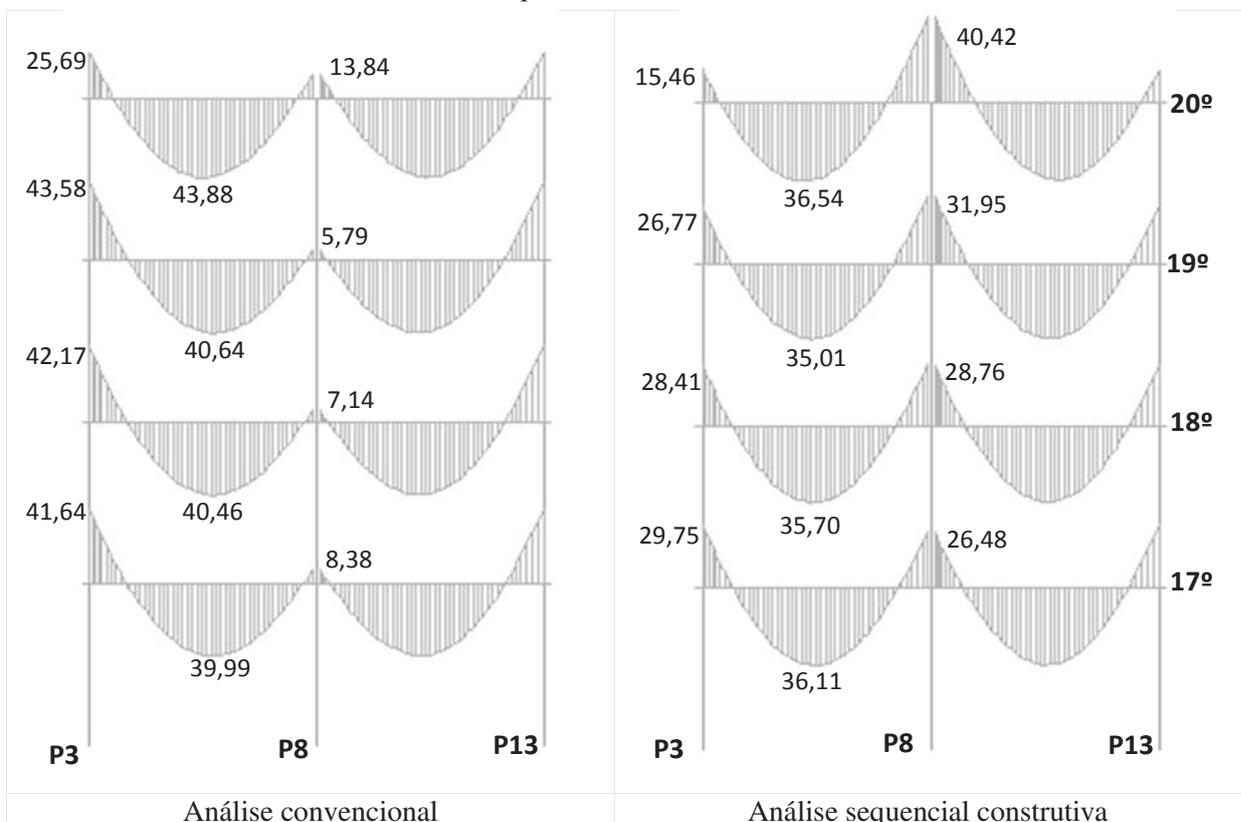
Fonte: Elaborado pela autora.

Observando-se a Tabela 20, averigua-se que os valores dos momentos fletores positivos obtidos pela análise sequencial construtiva superaram os obtidos pela análise convencional nos

pavimentos iniciais, mais precisamente até meia altura da edificação. Posteriormente, ocorreu uma redução nesses valores obtida pela análise sequencial construtiva.

A Figura 28 apresenta, de forma ilustrativa, os momentos fletores na viga V9 (viga do pórtico central da estrutura). Como se pode observar, nessa figura, estão apresentados apenas os momentos fletores a partir do 17º pavimento, uma vez que foram nos pavimentos superiores que se encontraram as maiores diferenças entre os dois modelos de análise abordados neste trabalho.

Figura 28 – Momentos fletores na viga V9 (em kN.m) para os modelos de análise convencional e sequencial construtivo.



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

c) Momentos fletores no pilar P3

Obtiveram-se os valores dos momentos fletores no pilar P3 para os modelos de análise convencional e sequencial construtivo. Os valores finais estão apresentados na Tabela 21 e na Tabela 22, nas quais são também apresentadas as diferenças percentuais dos momentos fletores na base e no topo do pilar P3 (Dif %) entre os dois modelos de análise, ao longo dos 20 pavimentos.

Tabela 21 – Momentos fletores no pilar P3 - base (em kN.m).

Pavimento	Análise convencional	Análise sequencial construtiva	Dif (%)
1	3,86	5,11	32,38
2	11,64	8,63	-25,85
3	11,58	9,42	-18,65
4	12,89	10,55	-18,15
5	14,57	12,07	-17,15
6	13,34	11,43	-14,31
7	15,86	13,20	-16,77
8	16,69	13,91	-16,65
9	17,53	14,43	-17,68
10	18,98	15,31	-19,33
11	17,16	13,87	-19,17
12	19,59	15,18	-22,51
13	20,10	15,24	-24,17
14	20,66	15,17	-26,57
15	22,12	15,53	-29,79
16	18,19	12,57	-30,89
17	20,73	13,38	-35,45
18	20,90	12,73	-39,09
19	21,00	11,91	-43,28
20	22,94	11,24	-51,00

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 22 – Momentos fletores no pilar P3 – topo (em kN.m).

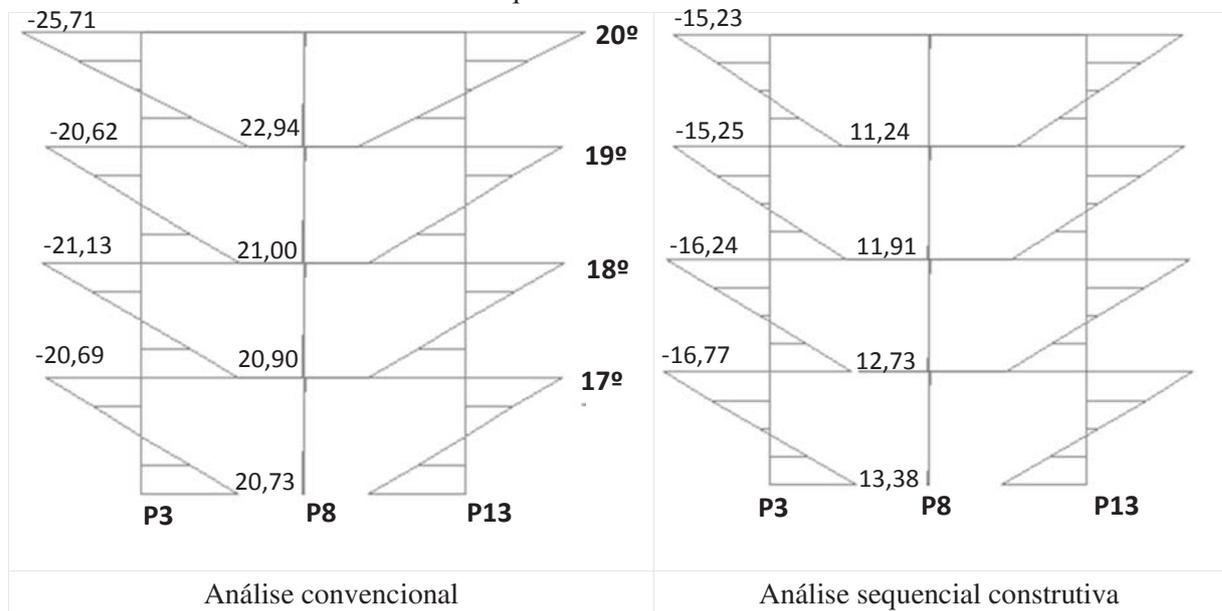
Pavimento	Análise convencional	Análise sequencial construtiva	Dif (%)
1	7,83	10,41	32,95
2	11,21	12,79	14,09
3	12,19	14,21	16,57
4	12,99	15,12	16,39
5	15,64	17,26	10,35
6	14,55	16,32	12,16
7	16,02	17,52	9,36
8	17,06	18,39	7,79
9	17,61	18,76	6,53
10	20,11	20,32	10,44
11	18,35	18,56	11,44
12	19,66	19,23	-2,18
13	20,40	19,45	-4,65
14	20,57	19,15	-6,90
15	23,69	20,47	-13,59
16	19,50	16,69	-14,41
17	20,69	16,77	-18,94
18	21,13	16,24	-23,14
19	20,62	15,25	-26,04
20	25,71	15,23	-40,76

Fonte: Elaborado pela autora.

Os dados que compõem as tabelas evidenciam que as diferenças percentuais são maiores nos últimos pavimentos da edificação. Tanto para os momentos na base quanto no topo do pilar, nos últimos pavimentos, foi obtida uma redução nos valores por meio da análise sequencial construtiva. Para o último pavimento, as diferenças dos momentos na base giraram em torno de 51%, enquanto que, no topo, em torno de 40%.

Na Figura 29, é possível observar ilustrativamente as diferenças comentadas do 17º ao 20º pavimento.

Figura 29 – Momentos fletores no pilar P3 (em kN.m) para os modelos de análise convencional e sequencial construtivo.



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

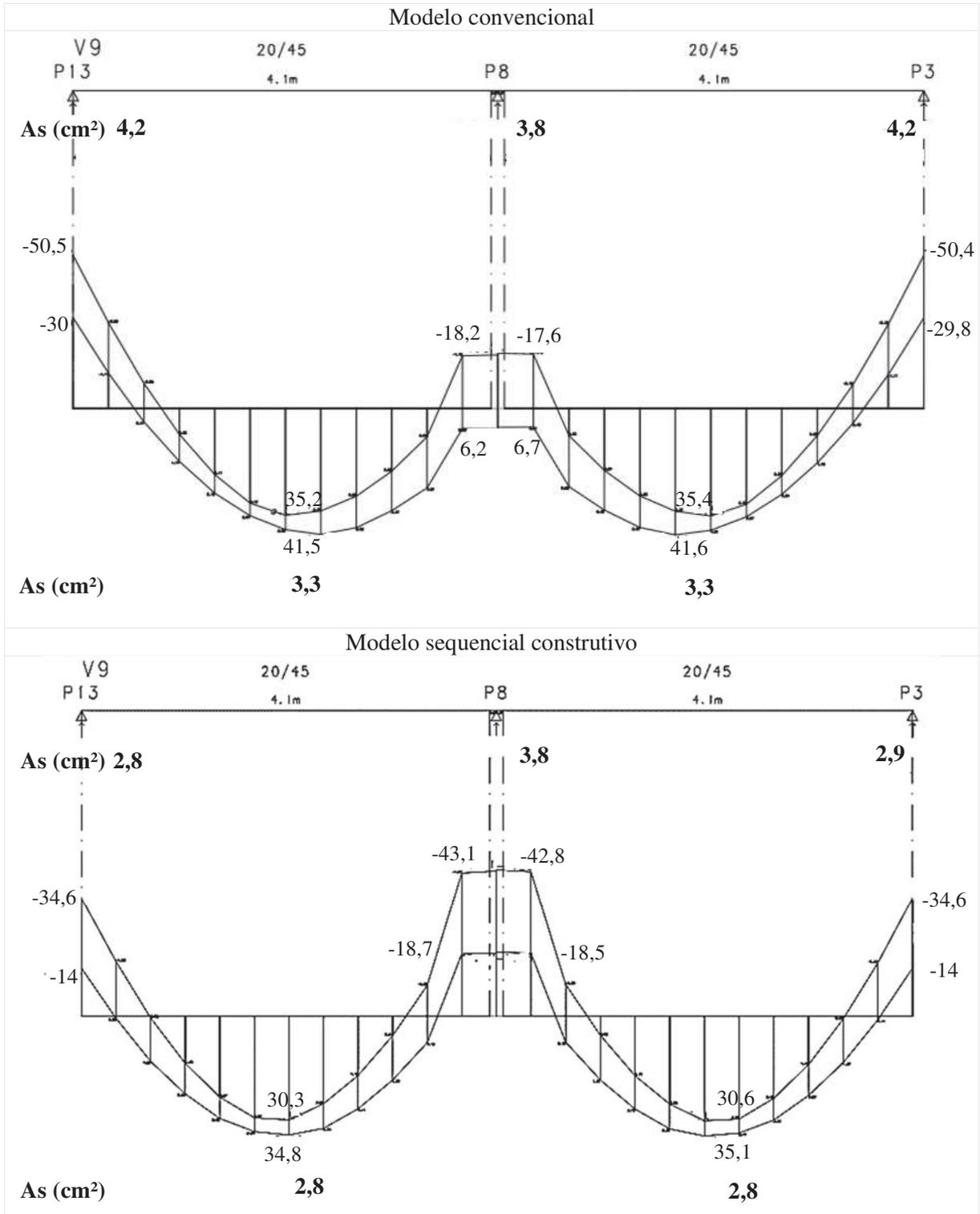
d) Diferenças em termos de dimensionamento para a viga V9 no 19º pavimento

A estrutura aqui detalhada foi dimensionada considerando os dois modelos abordados na pesquisa, lembrando que o carregamento para ambos os modelos é o mesmo, diferindo apenas pela forma como ele solicita a estrutura.

Em geral, os esforços nas vigas utilizando o *software* TQS V19 são obtidos através de um modelo de pórtico espacial, carregado com as ações determinadas pelo projetista. Esses esforços são então transferidos para o CAD/Vigas para o dimensionamento e o detalhamento dos elementos. Os esforços utilizados para o dimensionamento são transferidos em forma de envoltórias de diversos carregamentos. A título de comparação, estão apresentados, na Figura 30, os diagramas de envoltórias de momentos fletores para a viga V9 no 19º pavimento, obtidos

para o modelo convencional e sequencial construtivo. Junto com esses diagramas, estão também apresentadas as áreas de aço.

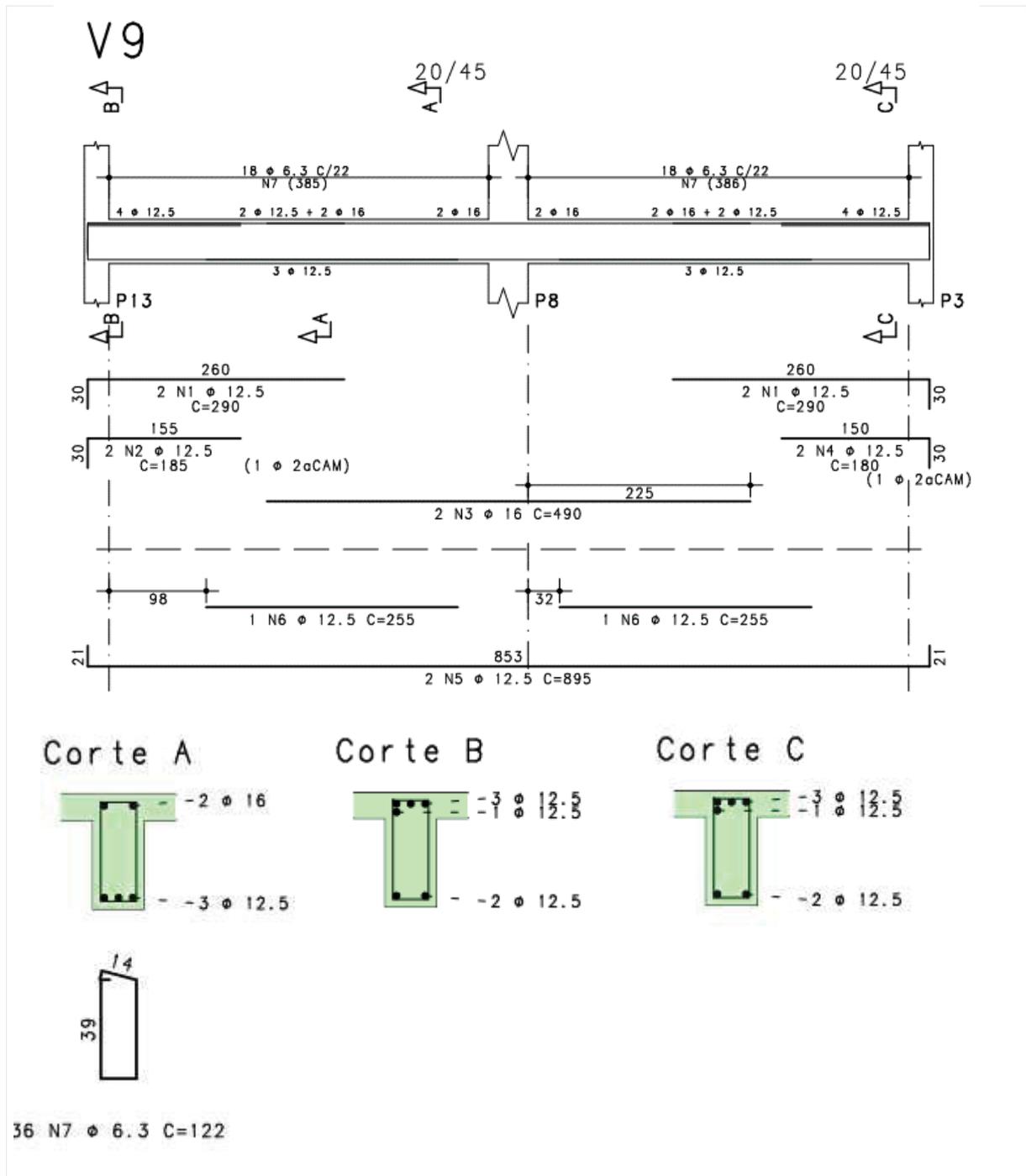
Figura 30 – Diagramas de envoltórias de momentos fletores para a viga V9 no 19º pavimento (em kN.m).



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

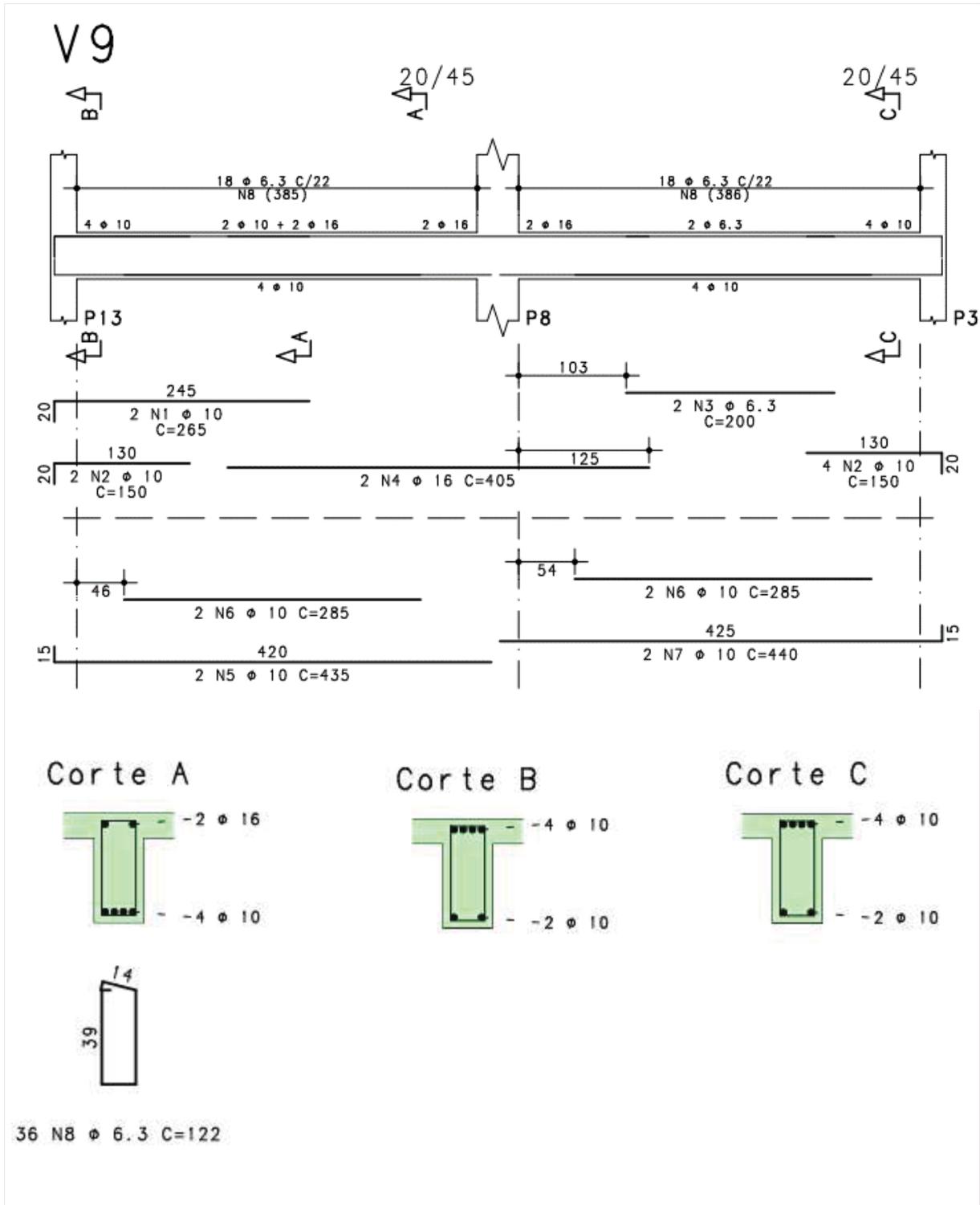
Na sequência, está apresentado o detalhamento da armadura dessa viga quando processada pelo modelo convencional e sequencial construtivo (Figura 31 e Figura 32). Cabe aqui salientar que todos os elementos estruturais foram dimensionados, mas foi escolhida a viga V9 do 19º pavimento do pórtico central para ser aqui detalhada como um exemplo.

Figura 31 – Detalhamento de armadura para a viga V9 no 19º pavimento pelo modelo convencional.



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do software TQS V19.

Figura 32 – Detalhamento de armadura para a viga V9 no 19º pavimento pelo modelo sequencial construtivo.



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

Para a estrutura analisada, os detalhamentos apresentados possibilitam a compreensão de que existem diferenças nas armaduras detalhadas para ambos os modelos. Essas diferenças

são encontradas não somente na viga V9, mas também nas demais vigas. Apesar da diferença no valor dos momentos sobre o apoio central, ambos conduziram a armadura mínima.

Na Tabela 23, encontra-se o resumo do aço para a viga V9.

Tabela 23 – Resumo do aço para a V9 no 19º pavimento.

ELEM	AÇO	POS	BIT (mm)	QUANT	COMPRIMENTO UNIT (cm)	COMPRIMENTO TOTAL (cm)
V9	50A	1	12.5	4	290	1160
	50A	2	12.5	2	185	370
	50A	3	16	2	490	980
	50A	4	12.5	2	180	360
	50A	5	12.5	2	895	1790
	50A	6	12.5	2	255	510
	50A	7	6.3	36	122	4392

RESUMO AÇO CA 50-60			
ACO	BIT (mm)	COMPR (m)	PESO (kg)
50A	6.3	44	11
50A	12.5	42	40
50A	16	10	15
Peso Total		50A =	67 kg

RESUMO AÇO CA 50-60			
ACO	BIT (mm)	COMPR (m)	PESO (kg)
50A	6.3	48	12
50A	10	43	27
50A	16	8	13
Peso Total		50A =	51 kg

Resumo de aço por elemento			
ELEM	PESO (kg)	PESO (kg+10%)	
V9	67	73	

Resumo de aço por elemento			
ELEM	PESO (kg)	PESO (kg+10%)	
V9	51	56	

Modelo convencional

Modelo sequencial construtivo

Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

A partir dos resultados obtidos, foi possível constatar que, no modelo convencional, a quantidade de aço obtida foi de 67 kg, enquanto que, para o modelo sequencial construtivo, foi de 51 kg. Esses resultados evidenciam mais uma vez que não somente ocorreram diferenças nos esforços, mas também no dimensionamento dos elementos estruturais quando realizada uma ou outra análise.

Cabe destacar que, uma vez que ocorre a redistribuição dos esforços, não é possível afirmar que um modelo seja mais econômico em relação ao outro, e sim, que existem diferenças entre eles.

e) Diferenças em termos de dimensionamento para o pilar P8 ao longo da altura da edificação

Além do dimensionamento das vigas, foi também realizado o dimensionamento de todos os pilares da edificação ao longo dos 20 pavimentos.

Na Tabela 24, estão apresentados os resultados obtidos para o pilar P8. Além disso, estão detalhadas, além do número de barras e respectivas bitolas, a área de aço e a taxa de armadura. Para tal detalhamento, foi selecionado o pilar P8, por se tratar de um pilar central na planta de formas.

Tabela 24 – Resumo do aço para o pilar P8 pelos dois modelos de análise.

Modelo convencional										
PILAR:P8										
Lance	Título	Seção [cm]		Área [cm ²]	NFer	Bitola [mm]	PDD x y		As [cm ²]	Taxa [%]
20	PAV 20	25.x	40.	1000.0	6	10.0	N	N	4.7	0.47
19	PAV 19	25.x	40.	1000.0	6	10.0	N	N	4.7	0.47
18	PAV 18	25.x	40.	1000.0	6	10.0	N	N	4.7	0.47
17	PAV 17	25.x	40.	1000.0	6	10.0	N	N	4.7	0.47
16	PAV 16	25.x	40.	1000.0	6	12.5	N	N	7.4	0.74
15	PAV 15	25.x	60.	1500.0	6	12.5	N	N	7.4	0.49
14	PAV 14	25.x	60.	1500.0	6	12.5	N	N	7.4	0.49
13	PAV 13	25.x	60.	1500.0	8	12.5	N	N	9.8	0.65
12	PAV 12	25.x	60.	1500.0	8	12.5	N	N	9.8	0.65
11	PAV 11	25.x	60.	1500.0	8	12.5	N	N	9.8	0.65
10	PAV 10	25.x	80.	2000.0	10	12.5	N	N	12.3	0.61
9	PAV 9	25.x	80.	2000.0	10	12.5	N	N	12.3	0.61
8	PAV 8	25.x	80.	2000.0	12	12.5	N	N	14.7	0.74
7	PAV 7	25.x	80.	2000.0	12	12.5	N	N	14.7	0.74
6	PAV 6	25.x	80.	2000.0	12	16.0	N	N	24.1	1.21
5	PAV 5	25.x	110.	2750.0	14	12.5	N	N	17.2	0.62
4	PAV 4	25.x	110.	2750.0	14	12.5	N	N	17.2	0.62
3	PAV 3	25.x	110.	2750.0	16	12.5	N	N	19.6	0.71
2	PAV 2	25.x	110.	2750.0	18	12.5	N	N	22.1	0.80
1	PAV 1	25.x	110.	2750.0	18	16.0	N	N	36.2	1.32

Modelo Sequencial construtivo										
PILAR:P8										
Lance	Título	Seção [cm]		Área [cm ²]	NFer	Bitola [mm]	PDD x y		As [cm ²]	Taxa [%]
20	PAV 20	25.x	40.	1000.0	6	10.0	N	N	4.7	0.47
19	PAV 19	25.x	40.	1000.0	6	10.0	N	N	4.7	0.47
18	PAV 18	25.x	40.	1000.0	6	10.0	N	N	4.7	0.47
17	PAV 17	25.x	40.	1000.0	6	10.0	N	N	4.7	0.47
16	PAV 16	25.x	40.	1000.0	6	12.5	N	N	7.4	0.74
15	PAV 15	25.x	60.	1500.0	6	12.5	N	N	7.4	0.49
14	PAV 14	25.x	60.	1500.0	6	12.5	N	N	7.4	0.49
13	PAV 13	25.x	60.	1500.0	8	12.5	N	N	9.8	0.65
12	PAV 12	25.x	60.	1500.0	8	12.5	N	N	9.8	0.65
11	PAV 11	25.x	60.	1500.0	10	12.5	N	N	12.3	0.82
10	PAV 10	25.x	80.	2000.0	10	12.5	N	N	12.3	0.61
9	PAV 9	25.x	80.	2000.0	12	12.5	N	N	14.7	0.74
8	PAV 8	25.x	80.	2000.0	12	12.5	N	N	14.7	0.74
7	PAV 7	25.x	80.	2000.0	18	12.5	N	N	22.1	1.10
6	PAV 6	25.x	80.	2000.0	18	16.0	N	N	36.2	1.81
5	PAV 5	25.x	110.	2750.0	18	12.5	N	N	22.1	0.80
4	PAV 4	25.x	110.	2750.0	18	12.5	N	N	22.1	0.80
3	PAV 3	25.x	110.	2750.0	18	12.5	N	N	22.1	0.80
2	PAV 2	25.x	110.	2750.0	18	16.0	N	N	36.2	1.32
1	PAV 1	25.x	110.	2750.0	20	16.0	N	N	40.2	1.46

Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

Os resultados apresentados na Tabela 24 demonstraram novamente que existem diferenças de dimensionamento quando a estrutura é processada pelo modelo convencional comparado ao modelo sequencial construtivo. Para os lances iniciais desse pilar, as diferenças foram mais expressivas.

Cabe aqui salientar que não foram editadas as armaduras, com objetivo de não influenciar os resultados fornecidos pelo *software*.

f) Influência do cronograma construtivo nos esforços

Entende-se por cronograma construtivo as etapas pelas quais a edificação passa do início ao seu término. Para avaliar a influência do cronograma construtivo nos esforços de vigas e pilares, foi realizada uma mudança no esquema de carregamento inicial.

Parte do cronograma construtivo inicial está detalhado no Quadro 7. A partir do esquema 4, não estão detalhados os carregamentos, pois estes são os mesmos já apresentados anteriormente, no Quadro 6.

Quadro 7 – Análise sequencial construtiva - Cronograma construtivo 1.

Esquema	Carregamento	Descrição do carregamento
1	1	PP ₁ + CC ₁
2	2	PP ₂ + CC ₂
3	3	PP ₃ + CC ₃ + ALV ₁ /REV ₁
4	4	PP ₄ + CC ₄ + ALV ₂ /REV ₂
...

Fonte: Elaborado pela autora.

A alteração realizada se refere ao início da construção da alvenaria. No novo cronograma, aqui denominado de cronograma construtivo 2, a alvenaria tem início em uma etapa subsequente. Em suma, essa mudança indica que quando é construído o 4º pavimento, inicia-se a alvenaria no 1º (Quadro 8). A sequência dos demais carregamento é análoga à apresentada no Quadro 6.

Quadro 8 – Análise sequencial construtiva – Cronograma construtivo 2.

Esquema	Carregamento	Descrição do carregamento
1	1	PP ₁ + CC ₁
2	2	PP ₂ + CC ₂
3	3	PP ₃ + CC ₃
4	4	PP ₄ + CC ₄ + ALV ₁ /REV ₁
...

Fonte: Elaborado pela autora.

Para verificar o quanto essa alteração interfere em termos de esforços em vigas e pilares, estão apresentados, na Tabela 25, os momentos fletores negativos na viga V9 sobre o pilar central P8, para os cronogramas construtivos 1 e 2.

Tabela 25 – Momentos fletores negativos na viga V9 sobre o pilar central P8 (em kN.m).

Pavimento	Análise sequencial construtiva (cronograma construtivo 1)	Análise sequencial construtiva (cronograma construtivo 2)	Dif (%)
1	41,39	41,40	0,02
2	36,39	36,45	0,16
3	32,10	32,19	0,28
4	28,29	28,35	0,21
5	25,34	25,38	0,15
6	27,06	27,07	0,03
7	23,99	23,99	0
8	21,57	21,57	0
9	19,67	19,63	-0,20
10	18,69	18,62	-0,37
11	20,64	20,54	-0,48
12	19,55	19,43	-0,61
13	19,19	19,05	-0,72
14	19,32	19,13	-0,98
15	20,71	20,49	-1,06
16	25,26	25,02	-0,95
17	26,48	26,22	-0,98
18	28,76	28,46	-1,04
19	31,95	31,46	-1,53
20	40,42	39,82	-1,48

Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se constatar que a variação nos esforços não foi significativa, ou seja, a alteração no cronograma construtivo pouco afetou os esforços aqui analisados.

g) Influência da variação da carga construtiva nos esforços

Como já foi abordado, uma série de valores é sugerida para as cargas que atuam durante a construção. Até o momento, o valor utilizado nas análises foi de 2 kN/m², indicado pela norma brasileira ABNT NBR 15696 (2009). Para efeito comparativo, foi realizada a mudança da carga de construção para 2,4 kN/m² indicada pelo comitê ACI 347 (2005), sendo adotado o mesmo esquema de carregamento já detalhado no Quadro 6.

Foram comparados aqui os valores de momentos fletores negativos na viga V9 sobre o pilar P8, como também os momentos fletores no topo do pilar P3 (Tabela 26 e Tabela 27). Valores de Dif (%) positivos indicam acréscimo nos esforços quando a carga de construção passa de 2 para 2,4 kN/m².

Tabela 26 – Momentos fletores negativos na viga V9 sobre o pilar central P8 (em kN.m).

Pavimento	Análise sequencial construtiva (carga de 2 kN/m²)	Análise sequencial construtiva (carga de 2,4 kN/m²)	Dif (%)
1	41,39	42,91	3,67
2	36,39	37,71	3,62
3	32,10	33,24	3,55
4	28,29	29,38	3,49
5	25,34	26,22	3,47
6	27,06	27,88	3,03
7	23,99	24,69	2,91
8	21,57	22,19	2,87
9	19,67	20,23	2,84
10	18,69	19,22	2,83
11	20,64	21,24	2,90
12	19,55	20,13	2,96
13	19,19	19,77	3,02
14	19,32	19,94	3,20
15	20,71	21,40	3,33
16	25,26	26,29	4,07
17	26,48	27,61	4,26
18	28,76	30,03	4,41
19	31,95	33,41	4,56
20	40,42	42,22	4,45

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 27 – Momentos fletores no pilar P3 - topo (em kN.m).

Pavimento	Análise sequencial construtiva (carga de 2 kN/m²)	Análise sequencial construtiva (carga de 2,4 kN/m²)	Dif (%)
1	10,41	10,92	4,89
2	12,79	13,38	4,61
3	14,21	14,85	4,50
4	15,12	15,80	4,49
5	17,26	18,02	4,40
6	16,32	17,01	4,22
7	17,52	18,24	4,10
8	18,39	19,15	4,13
9	18,76	19,52	4,05
10	20,32	21,14	4,03
11	18,56	19,31	4,04
12	19,23	19,99	3,95
13	19,45	20,21	3,90
14	19,15	19,90	3,91
15	20,47	21,24	3,76
16	16,69	17,34	3,89
17	16,77	17,41	3,81
18	16,24	16,84	3,69
19	15,25	15,81	3,67
20	15,23	15,71	3,15

Fonte: Elaborado pela autora.

Pela análise das tabelas, observa-se que os esforços tiveram um aumento em todos os pavimentos quando ocorreu a variação na carga construtiva. As maiores diferenças obtidas giraram próximo de 5%, que, embora não seja uma diferença tão significativa, pode causar efeitos localizados nas lajes em razão da mudança na carga construtiva.

4.5 Estrutura 5

4.5.1 Características da estrutura analisada

A estrutura 5 trata-se de um edifício residencial com as seguintes características:

- a) A estrutura é composta por 19 pavimentos com pé-direito variável.
- b) Trata-se de uma edificação real que se encontra em fase de construção, no município de Passo Fundo-RS.
- c) O edifício tem uma planta de geometria irregular, diferente dos demais casos analisados.
- d) Estrutura composta por lajes, vigas, pilares e escadas.
- e) Os pilares e vigas têm seção variável ao longo da altura da edificação (as dimensões utilizadas foram fornecidas pelo escritório de cálculo estrutural responsável pela obra).
- f) Considerou-se todos os pilares rotulados na fundação (consideração utilizada pelo calculista de fundações).
- g) As lajes são maciças e têm espessura de 11 cm.
- h) Estrutura de concreto armado com resistência característica à compressão de 40 MPa até o 5º pavimento, posteriormente, a resistência reduz para 30 MPa.

O Quadro 9 apresenta os pavimentos da edificação, sua descrição e pé-direito.

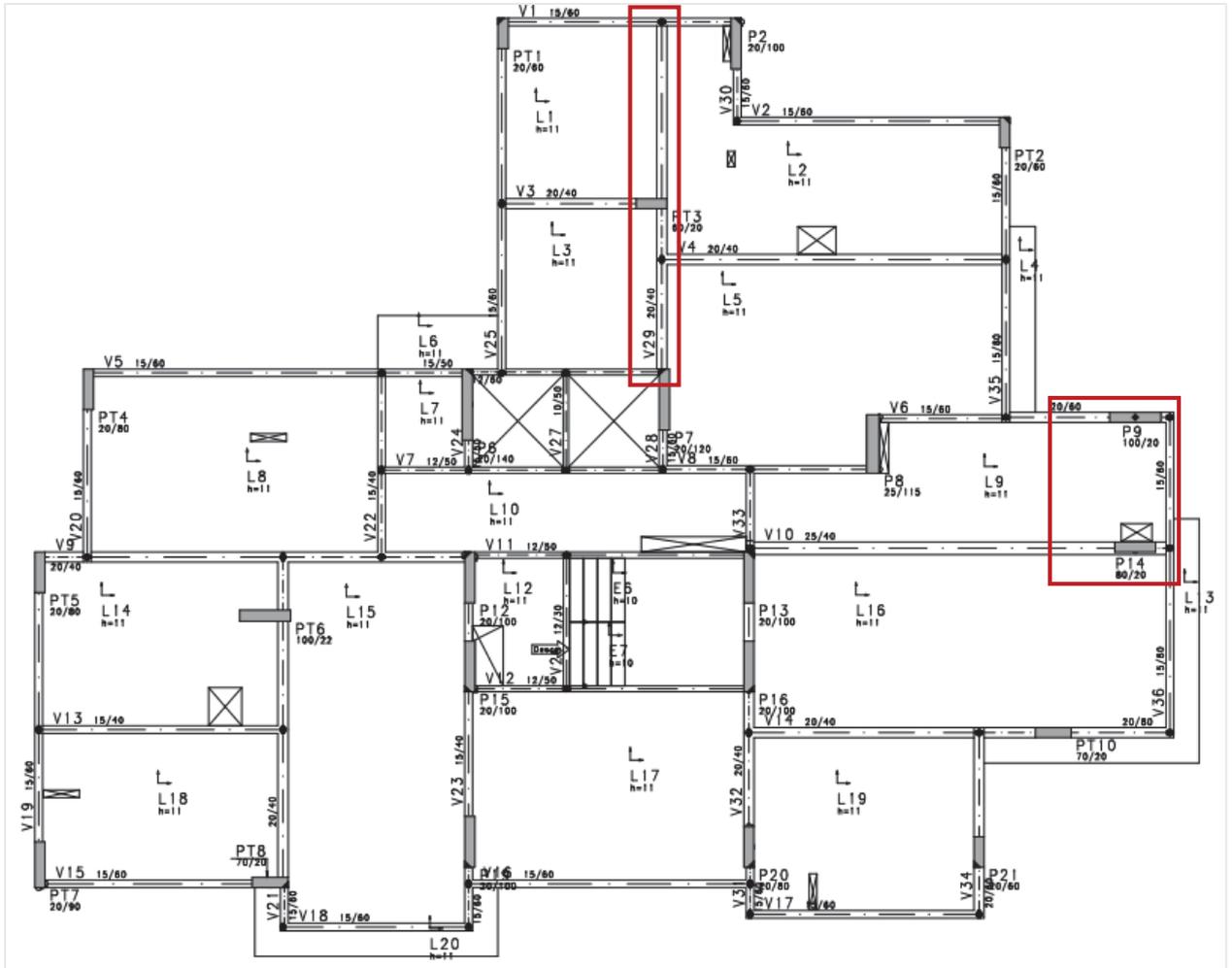
Quadro 9 – Descrição dos pavimentos da edificação.

Pavimentos	Descrição	Pé-direito (m)
1º	Subsolo II	2,90
2º	Subsolo I	3,40
3º	Térreo	3,40
4º	Condominial	3,10
5º ao 18º	Pavimento Tipo	3,10
19º	Cobertura	3,10

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 33, está apresentada a planta de formas do pavimento tipo da edificação, destacando-se os elementos que foram alvo de comparação específica.

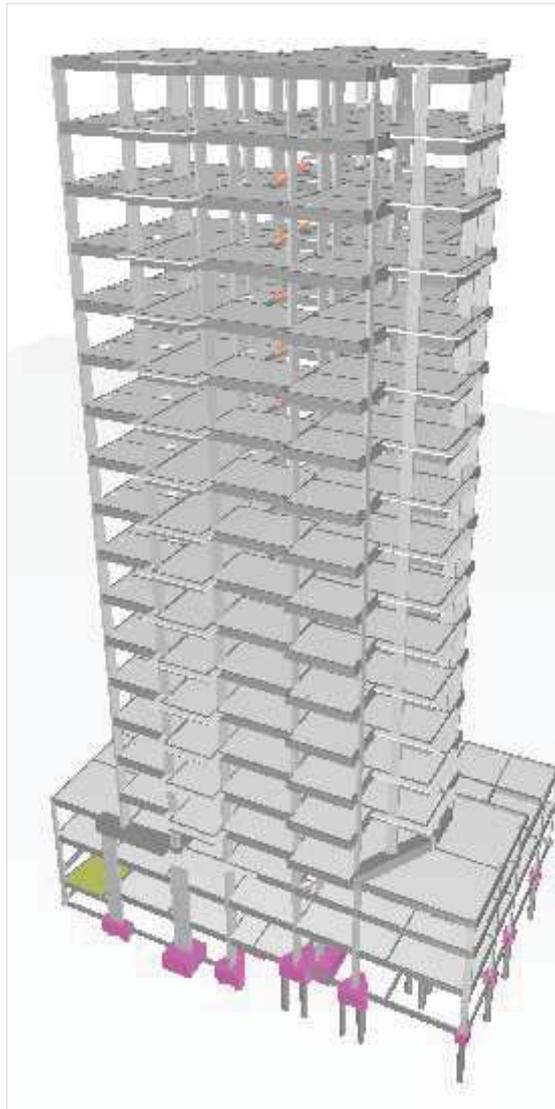
Figura 33 – Planta de formas do pavimento tipo.



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19, com base em informações fornecidas pelo projetista estrutural.

Na Figura 34, tem-se uma vista isométrica da edificação, e é possível observar todos os elementos que compõem a estrutura, entre eles: pilares, vigas, lajes, escadas e fundações.

Figura 34 – Vista isométrica da edificação.



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

4.5.2 Modelos e carregamentos

Para a análise da estrutura 5, foi adotado o seguinte carregamento:

- P_{Pi}: Peso próprio no andar *i*.
- C_{CCi}: Carga de construção no andar *i* (2 kN/m² atuando nas lajes).
- A_{ALVi}/R_{REVi}: Carga de alvenaria e revestimento no andar *i* (cargas consideradas de acordo com o projeto arquitetônico da edificação).
- S_{SCi}: Carga de ocupação ou sobrecarga no andar *i* (1,5 kN/m² atuando nas lajes).

Para o modelo sequencial construtivo, foi utilizado o módulo efeito incremental do *software* TQS e elaborado um cronograma construtivo, indicando em qual etapa cada carregamento passa a atuar na estrutura.

O Quadro 10 apresenta um resumo das estruturas e carregamentos do modelo sequencial construtivo.

Neste exemplo, também foram omitidas as figuras correspondentes às estruturas e aos carregamentos 1 a 24, devido à analogia existente com os exemplos anteriores.

Quadro 10 – Resumo das estruturas e carregamentos do modelo sequencial construtivo.

Esquema	Carregamento	Descrição do carregamento
1	1	PP ₁ + CC ₁
2	2	PP ₂ + CC ₂
3	3	PP ₃ + CC ₃
4	4	PP ₄ + CC ₄
5	5	PP ₅ + CC ₅ + ALV ₁ /REV ₁
6	6	PP ₆ + CC ₆ + ALV ₂ /REV ₂
7	7	PP ₇ + CC ₇ + ALV ₃ /REV ₃
8	8	PP ₈ + CC ₈ + ALV ₄ /REV ₄
9	9	PP ₉ + CC ₉ + ALV ₅ /REV ₅
10	10	PP ₁₀ + CC ₁₀ + ALV ₆ /REV ₆
11	11	PP ₁₁ + CC ₁₁ + ALV ₇ /REV ₇
12	12	PP ₁₂ + CC ₁₂ + ALV ₈ /REV ₈
13	13	PP ₁₃ + CC ₁₃ + ALV ₉ /REV ₉
14	14	PP ₁₄ + CC ₁₄ + ALV ₁₀ /REV ₁₀
15	15	PP ₁₅ + CC ₁₅ + ALV ₁₁ /REV ₁₁
16	16	PP ₁₆ + CC ₁₆ + ALV ₁₂ /REV ₁₂
17	17	PP ₁₇ + CC ₁₇ + ALV ₁₃ /REV ₁₃
18	18	PP ₁₈ + CC ₁₈ + ALV ₁₄ /REV ₁₄
19	19	PP ₁₉ + CC ₁₉ + ALV ₁₅ /REV ₁₅
	20	ALV ₁₆ /REV ₁₆
	21	ALV ₁₇ /REV ₁₇
	22	ALV ₁₈ /REV ₁₈
	23	ALV ₁₉ /REV ₁₉
	24	SC ₁ a SC ₁₉

Fonte: Elaborado pela autora.

4.5.3 Considerações

Para a análise dessa estrutura, adotou-se as mesmas considerações já detalhadas em 4.2.3. Além das considerações citadas dentro do item, para a análise, foi utilizado o valor de *fck* diferenciado por planta, cujos valores de resistência foram descritos nas características da estrutura. Considerou-se um ciclo de concretagem de 14 dias entre os pavimentos e, para o traçado da curva de evolução da resistência do concreto com a idade, foi utilizado o cimento

CPII, mesmo cimento utilizado na obra, cujos coeficientes de variação de resistência já foram apresentados anteriormente neste trabalho.

4.5.4 Comparações realizadas e resultados obtidos

Foram aqui analisados os seguintes itens:

- a) Deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P9 e P14, indicados na planta de formas.
- b) Dimensionamento da viga 29 do 19º pavimento.
- c) Monitoramento dos encurtamentos axiais dos pilares P9 e P14 durante a fase de construção da edificação.
- d) Simulação numérica sequencial construtiva da edificação até a fase de acompanhamento da obra, para comparação dos deslocamentos (encurtamentos) obtidos numericamente com as medições realizadas.

a) Deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P9 e P14

Os pilares P9 e P14 nascem no segundo pavimento da edificação (subsolo 1). Os valores finais dos deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P9 e P14 (medidos no nó superior) ao longo dos 19 pavimentos foram obtidos para os modelos convencional e sequencial construtivo. Esses valores são mostrados na Tabela 28, na qual são também apresentadas as diferenças percentuais (Dif %) entre os dois modelos. Diferenças percentuais positivas indicam acréscimo nos deslocamentos obtidos pela análise sequencial.

Tabela 28 – Deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P9-P14 (em mm).

Pavimento	Análise convencional	Análise sequencial construtiva	Dif (%)
1	Pilar não existente	Pilar não existente	-
2	0,01	0,03	200
3	-0,05	0,01	-120
4	0,04	0,29	625
5	0,76	0,9	18,42
6	1,29	1,45	12,40
7	1,79	1,88	5,02
8	2,22	2,23	0,45
9	2,62	2,53	-3,43
10	2,97	2,76	-7,07
11	3,28	2,90	-11,58
12	3,54	2,97	-16,10
13	3,77	2,96	-21,48
14	3,96	2,89	-27,02
15	4,12	2,74	-33,49
16	4,24	2,54	-40,09
17	4,33	2,28	-47,34
18	4,38	1,94	-55,70
19	4,40	1,54	-65

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados evidenciam a influência tanto da altura quanto da geometria da edificação nos deslocamentos diferenciais verticais. Para todos os casos analisados, a estrutura 5 foi a que apresentou a maior diferença em termos de deslocamento diferencial vertical no último pavimento, atingindo uma porcentagem de 65%.

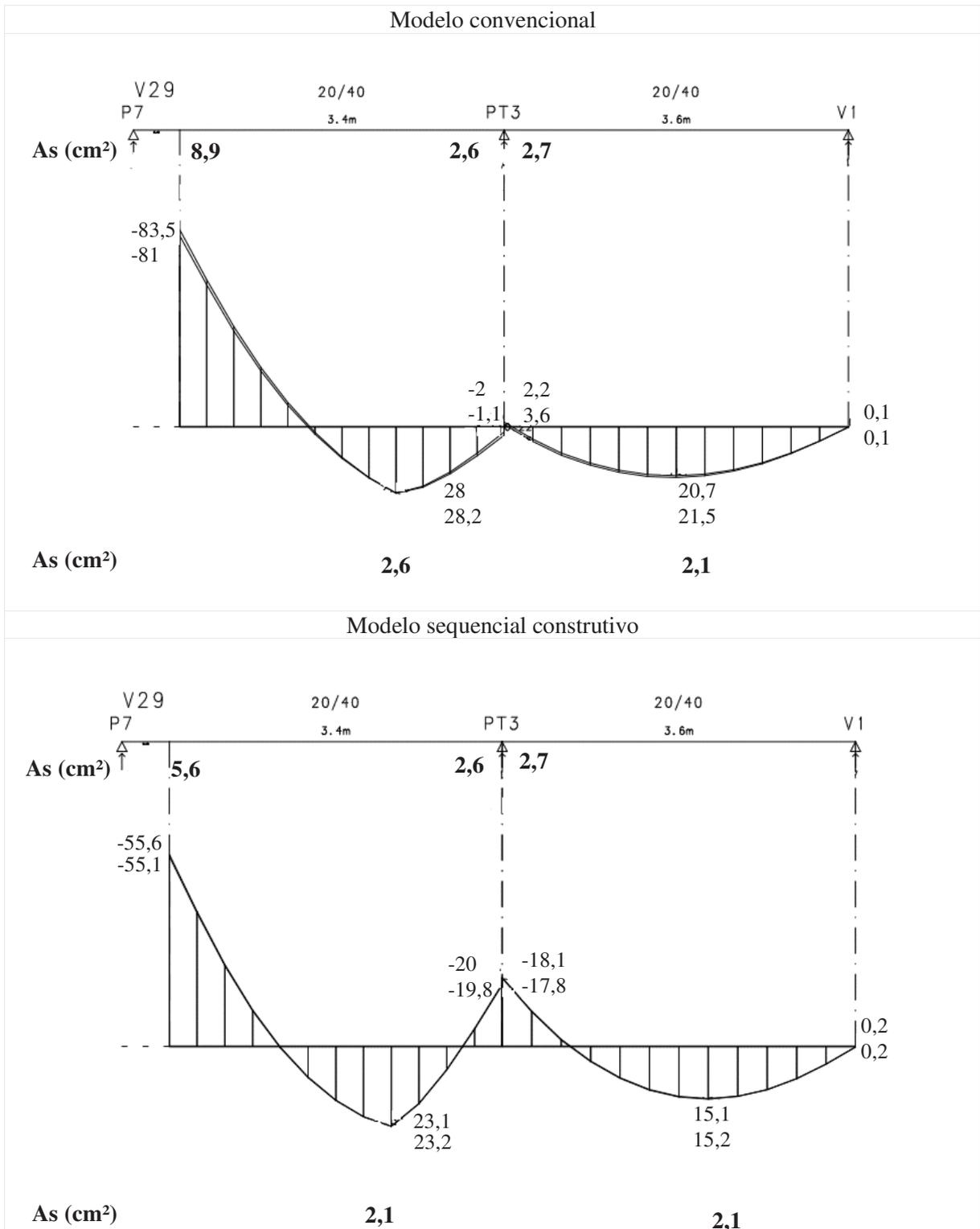
b) Dimensionamento da viga V29 do 19º pavimento

A estrutura 5 foi dimensionada considerando os dois modelos abordados na pesquisa, modelo convencional e modelo sequencial construtivo.

Conforme já comentado, os esforços nas vigas utilizando o *software* TQS V19 utilizados para o dimensionamento são transferidos em forma de envoltórias de diversos carregamentos. A novo título de comparação, estão apresentados, na Figura 35, os diagramas de envoltórias de momentos fletores para a viga V29 no 19º pavimento obtidos para os modelos convencional e sequencial construtivo.

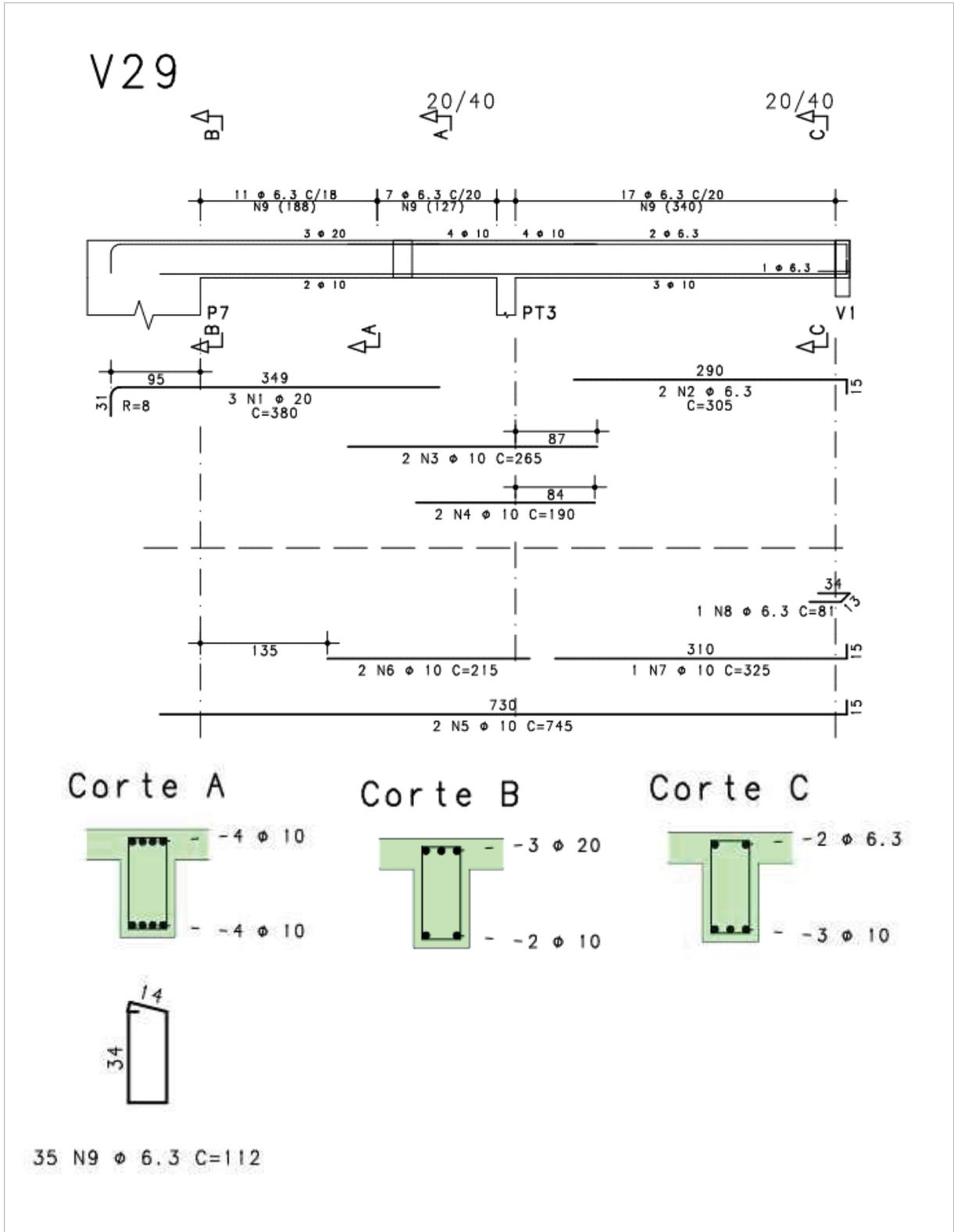
Na sequência, a Figura 36 e a Figura 37 apresentam o detalhamento de armadura para os dois modelos de análise efetuados.

Figura 35 – Diagramas de envoltórias de momentos fletores para a viga V29 no 19º pavimento (em kN.m).



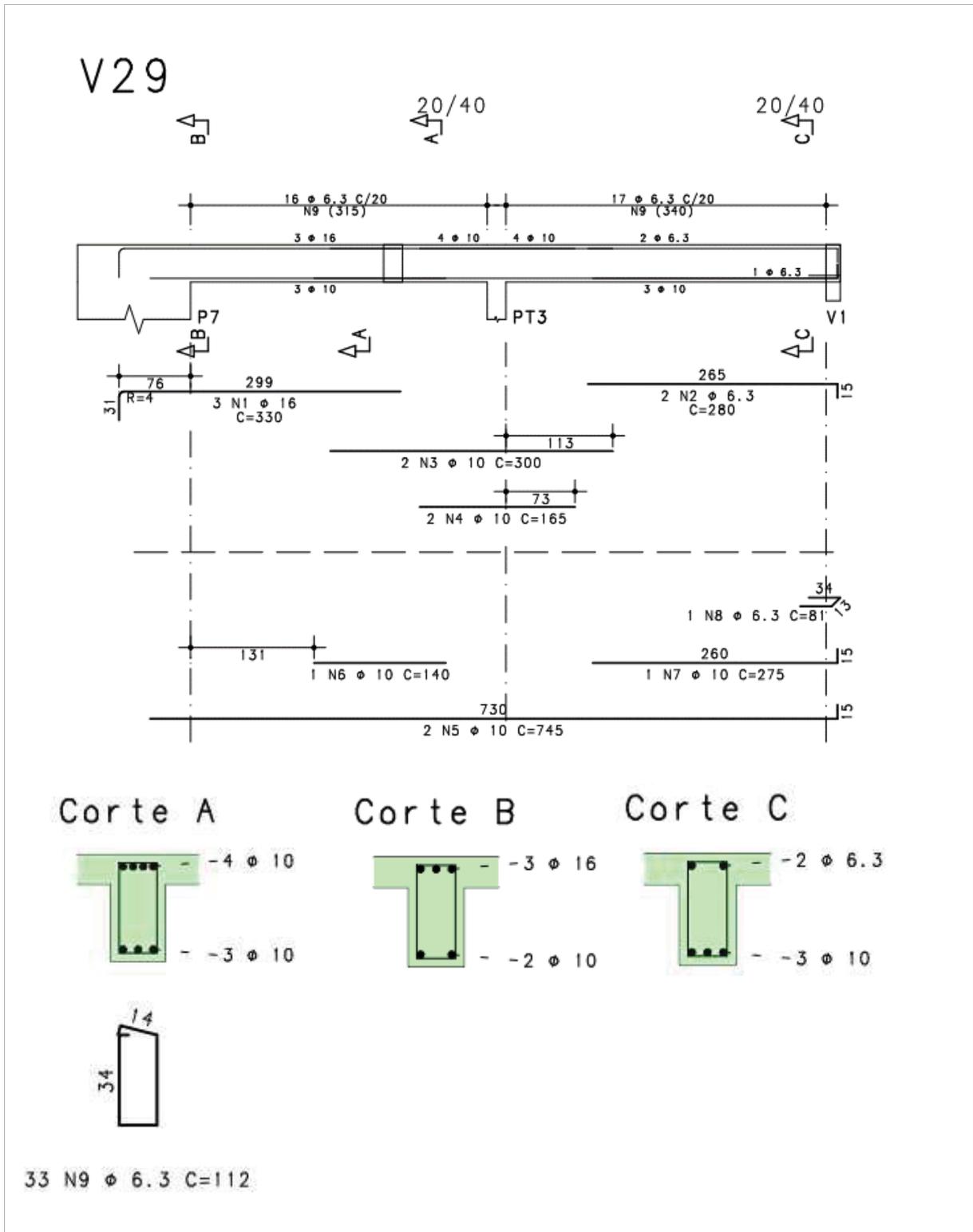
Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

Figura 36 – Detalhamento de armadura para a viga V29 no 19º pavimento pelo modelo convencional.



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

Figura 37 – Detalhamento de armadura para a viga V29 no 19º pavimento pelo modelo sequencial construtivo.



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do software TQS V19.

Para esse caso de edificação com geometria irregular, evidencia-se novamente que existem diferenças em termos de dimensionamento quando a estrutura é processada de acordo com um ou outro modelo de análise. Foi escolhido detalhar apenas um elemento para demonstrar essas diferenças, embora elas ocorram em diversos elementos.

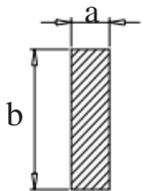
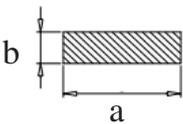
No que refere ao quantitativo de aço para a viga aqui selecionada, no modelo convencional, foram obtidos 59 kg de aço, enquanto que, no modelo sequencial construtivo, 44 kg de aço.

c) Monitoramento do encurtamento axial dos pilares P9 e P14 durante a fase de construção da edificação

A escolha dessa edificação para o monitoramento baseou-se na necessidade de um edifício que estivesse no início de construção, para que fosse possível acompanhar toda a sequência construtiva e obter os deslocamentos diferenciais verticais (encurtamentos axiais diferenciais) dos pilares em todos os estágios de construção.

Na sequência da definição da edificação, foi realizada uma visita em campo, com objetivo de selecionar os pilares que fariam parte da análise. A escolha ficou limitada devido a alguns fatores, entre os quais pode-se citar: tipologia arquitetônica, necessidade de pilares que apresentassem continuidade do início ao término da edificação; e necessidade de pilares de periferia, para garantir a visibilidade dos equipamentos para se efetuar as medições. Em função desses fatores, os pilares que fizeram parte do monitoramento foram P9 e P14 (demarcados na planta de formas do pavimento tipo). O Quadro 11 apresenta as dimensões desses pilares até o nível que foi possível realizar as medições.

Quadro 11 – Dimensões dos pilares P9 e P14.

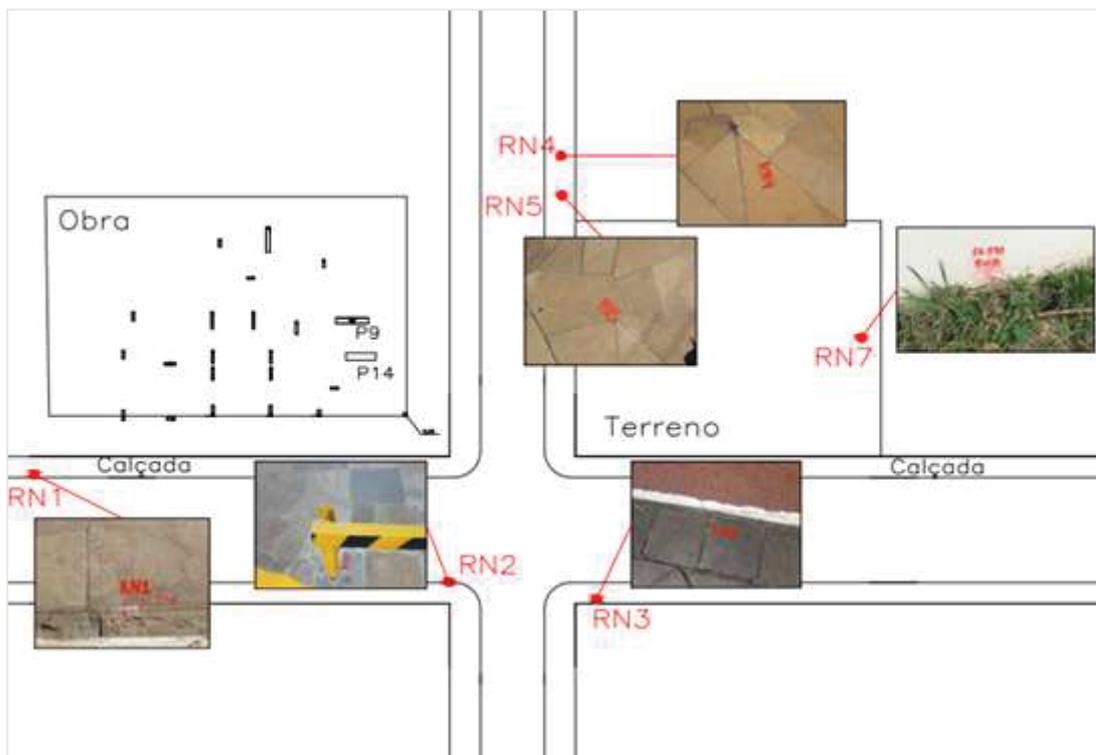
Andar	 P9		 P14	
	a (cm)	b (cm)	a (cm)	b (cm)
Sub 1- Térreo	20	120	100	25
Tér – Cond.	20	120	100	25
Cond/1º tipo	120 (rotação)	20 (rotação)	100	25
1º tipo/6º tipo	100	20	80	20

Fonte: Elaborado pela autora.

- **Instrumentação – Nivelamento geométrico duplo**

Para controle e medição dos deslocamentos, foram implantados topograficamente seis RNs (Referências de nível), dispostos estrategicamente para que as leituras nos pontos em que devem ser medidos os deslocamentos fossem feitas diretamente, sem interferência visual, eliminando, assim, erros acumulativos por eventuais mudanças no processo de nivelamento para visar aos pontos de interesse. A Figura 38 apresenta, de forma esquemática, a locação dos RNs em relação à edificação.

Figura 38 – Planta esquemática com a locação dos RNs.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os RNs foram demarcados com a utilização de um prego metálico cravado nas calçadas, com exceção do RN7, que se encontra no terreno à frente da edificação. Para demarcar esse RN7, foi cravado um corpo de prova de concreto no terreno com o centro marcado. A Figura 39 ilustra a locação de um dos RNs (RN 1).

Figura 39 – Locação do RN 1.



Fonte: a autora.

Para garantir eficiência no processo de medição dos deslocamentos, procurou-se uma metodologia de precisão no nivelamento dos RNs implantados. O método escolhido foi o nivelamento geométrico duplo (nivelamento e contranivelamento), pois tem característica de detectar erros e precisões do próprio nivelamento. O método se baseia na obtenção de cotas dos RNs a partir da leitura de miras graduadas realizadas por meio de visadas horizontais, conforme pode ser observado na Figura 40.

Figura 40 – Nivelamento geométrico duplo.



Fonte: a autora.

Escolhida a metodologia, optou-se pela utilização de um nível que, de acordo com a ABNT NBR 13133 (1996), se enquadra em uma classe de precisão alta, com tolerância de $\leq \pm 3$ mm/km, conforme pode ser observado na Tabela 29.

Tabela 29 – Classificação dos níveis.

Classes de níveis	Desvio-padrão
Precisão baixa	$> \pm 10\text{mm/km}$
Precisão média	$\leq \pm 10\text{mm/km}$
Precisão alta	$\leq \pm 3\text{mm/km}$
Precisão muito alta	$\leq \pm 1\text{mm/km}$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 13133 (1996)

Os instrumentos utilizados no método de nivelamento geométrico estão descritos no Quadro 12.

Quadro 12 – Instrumentos utilizados no método de nivelamento geométrico.

Equipamento	Descrição
	Nível a laser marca Topcon – Precisão de 2mm/Km duplo de nivelamento
	Tripé de alumínio trava borboleta e trava rápida
	Mira de alumínio encaixe 5M, marca Geotech
	Nível de mão

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 30, são apresentadas as cotas do nivelamento geométrico duplo da rede de nível implantada para verificação da precisão do instrumento.

Tabela 30 – Verificação da precisão do nivelamento.

RNs	Nivelamento direto (mm)	Contranivelamento (mm)	Diferença
RN 2	100.000	100.000	0
RN 1	98.237	98.237	0
RN 3	99.628	99.628	0
RN 4	104.668	104.668	0
RN 5	104.538	104.538	0
RN7	103.227	103.227	0

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme pode ser visto na Tabela 30, as diferenças entre o nivelamento e o contranivelamento comprovaram a precisão entre as cotas implantadas.

O nivelamento geométrico também foi usado para obtenção das cotas que serviram de base para o cálculo dos recalques no subsolo 1. No subsolo 1, os pontos de controle utilizados foram ferros concretados dentro dos sargentos dos pilares, sendo que estes estão a aproximadamente 80 cm do bloco de fundação (usados para controle dos recalques). A Figura 41 ilustra a posição dos pontos de controle no pavimento mencionado.

Figura 41 – Identificação dos pontos de controle no subsolo 1.



Fonte: a autora.

- **Instrumentação – Nivelamento trigonométrico**

Após implantação da rede de nível, buscou-se uma metodologia para o levantamento das cotas dos pontos de interesse (pilares 9 e 14). Em função da disposição dos pontos de interesse e dos grandes desníveis, adotou-se a metodologia de nivelamento trigonométrico com uso do equipamento estação total. Esse método de nivelamento consiste na resolução de um triângulo retângulo, no qual é conhecida sua hipotenusa e um de seus ângulos, e, assim, é possível determinar o cateto que represente a sua cota. O nivelamento trigonométrico, ao contrário do geométrico, utiliza visadas inclinadas para obtenção das distâncias.

Foram fixados adesivos refletivos nos pilares citados, com a utilização de cola de Poliuretano PU 44, que serviram de referência para o posicionamento do prisma e das medições. A posição para inserção do adesivo seguiu dois critérios: o mais próximo possível do encontro da viga com o pilar e um local que garantisse acesso ao longo da construção.

As medições foram feitas de forma direta, sempre instalando o equipamento em um ponto conhecido da rede de nível que possibilitava a visada direta dos pontos nos pilares, assim, não acumulando erros de transporte de cota, restringindo a precisão e perícia do operador. Vale ressaltar que tanto para o nivelamento geométrico quanto para o trigonométrico os equipamentos foram operados por uma equipe especializada em serviços topográficos.

Na Figura 42 estão ilustradas algumas etapas do processo de medição descrito.

Figura 42 – Etapas das medições.



Fonte: a autora.

Os instrumentos usados no método de nivelamento trigonométrico estão descritos no Quadro 13.

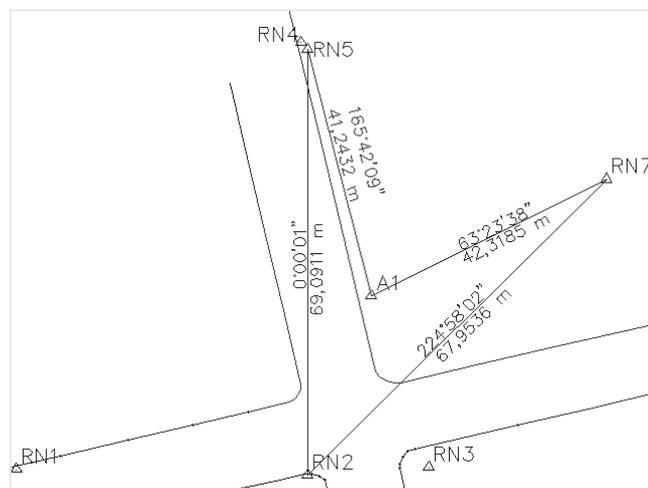
Quadro 13 – Instrumentos utilizados pelo método de nivelamento trigonométrico.

Equipamento	Descrição
	Estação total Topcon GTS- 239 W– Precisão de $\pm 2\text{mm}$
	Prisma simples
	Adesivo refletivo (4 x 4 cm)
	Adesivo monocomponente Poliuretano PU 44, marca Siloc

Fonte: Elaborado pela autora.

Para confirmar a precisão do equipamento utilizado para medição dos deslocamentos, realizou-se uma poligonal planialtimétrica (Figura 43).

Figura 43 – Poligonal planialtimétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados de precisão obtidos são apresentados na Tabela 31, na qual é possível observar que a precisão altimétrica resultou em ± 1 mm.

Tabela 31 – Verificação da precisão do nivelamento trigonométrico.

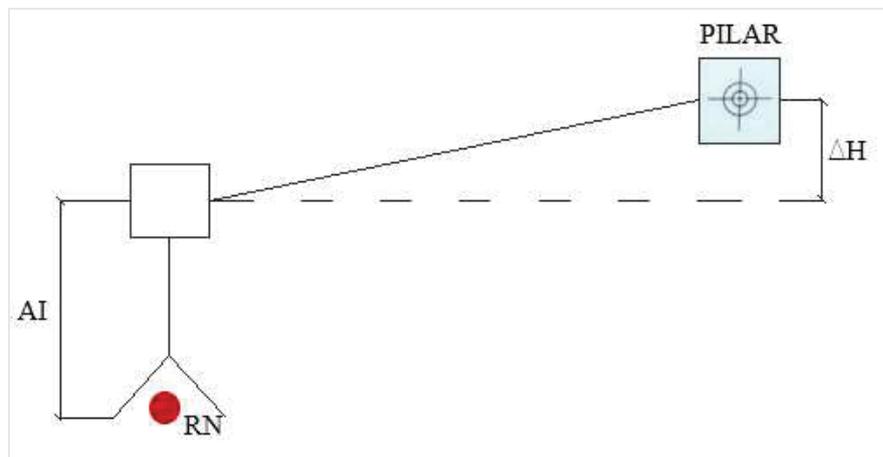
	Erros
Angular	0°00'03''
Relativo	1:32138
Linear	0,0069m
Eixo norte	0,0006m
Eixo leste	-0,0068m
Altimétrico	0,001m

Fonte: Adaptado de sistema topoGRAPH 98 SE 1998

- **Obtenção dos encurtamento axiais e recalques**

A Figura 44 ilustra o processo para a obtenção das cotas que serviram de base para o cálculo dos encurtamentos axiais, sendo que, na equação 3, tem-se a relação utilizada para a obtenção das cotas finais.

Figura 44 – Processo de medição para obtenção das cotas.



Fonte: Elaborado pela autora.

$$CÁLCULO DA COTA = COTA RN + AI + \Delta H \quad (3)$$

Onde:

Cota RN: cota conhecida do RN de acordo com o nivelamento geométrico;

AI: altura do instrumento;

ΔH : diferença de altura obtida pelo nivelamento trigonométrico.

Os encurtamentos axiais foram obtidos pela diferença de cotas entre duas medições consecutivas, sendo que, a cada concretagem, os pilares 9 e 14 foram medidos novamente, para se obter um histórico de acordo com a sequência de construção. A Figura 45, Figura 46 e a Figura 47 apresentam a demarcação esquemática dos pontos de controle no pilar 14, e o mesmo procedimento vale para o pilar 9. As etapas intermediárias não estão apresentadas em função da analogia do processo.

As sequências de concretagem foram realizadas em média a cada 14 dias. As medições ocorreram de março a julho de 2017.

Figura 45 – Ilustração da posição do ponto de controle no subsolo 1.



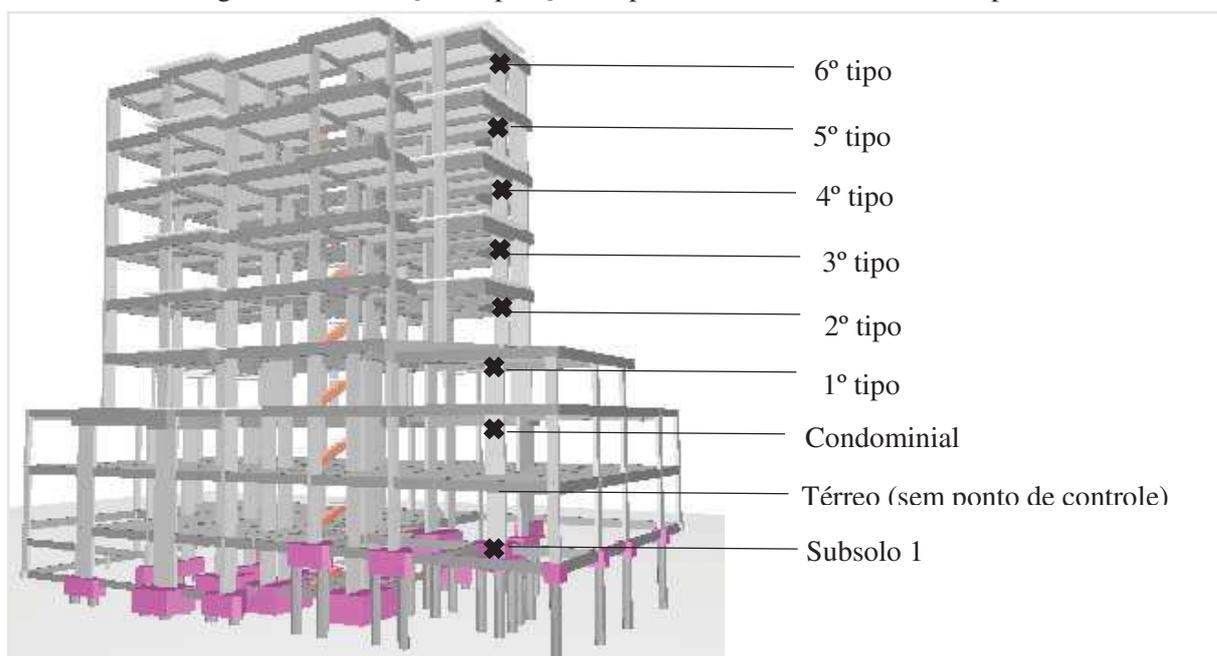
Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

Figura 46 – Ilustração da posição do ponto de controle no pavimento condominial.



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

Figura 47 – Ilustração da posição do ponto de controle em todos os pavimentos.



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* TQS V19.

Na Tabela 32, estão apresentados os encurtamentos axiais absolutos de acordo com a sequência construtiva da edificação. Na primeira coluna, estão expostos os pavimentos, na segunda, os pilares monitorados, nas colunas subsequentes, o número de pavimentos concretados (sobrecargas) e o respectivo encurtamento axial obtido a cada concretagem. Na última coluna, estão apresentados os encurtamentos totais.

Tabela 32 – Encurtamentos axiais absolutos de acordo com a sequência de construção (em mm).

Pav	Pilar	Sobrecargas							Total
		1 pav	2 pav	3 pav	4 pav	5 pav	6 pav	7 pav	
1º	P9	0	1	0	1	0	0	*	2
	P14	0	2	0	0	1	0	*	3
2º	P9		1	1	0	0	0	*	2
	P14		1	0	0	0	1	*	2
3º	P9			0	1	0	*	*	1
	P14			0	1	1	*	*	2
4º	P9				1	0	*	*	1
	P14				0	1	*	*	1
5º	P9					0	0	0	0
	P14					0	0	1	1
6º	P9						1	0	1
	P14						1	1	2
7º	P9							*	*
	P14							*	*

* não foi possível a obtenção das cotas em função de interferências construtivas.

Fonte: Elaborado pela autora.

O primeiro encurtamento (1 pav) equivale ao encurtamento do pilar que vai do subsolo 1 até o condominial, uma vez que não foi inserido um ponto de controle no térreo

Como pode ser observado pela tabela, não foi possível monitorar os encurtamentos ao longo dos 19 pavimentos. Isso ocorreu em função do início das alvenarias, que acabou impedindo o acesso aos pontos de controle fixados nos pilares.

Na Tabela 33, estão apresentados os encurtamentos axiais diferenciais, os quais foram obtidos pela diferença do encurtamento dos pilares 9 e 14 ao longo dos pavimentos.

Tabela 33 – Encurtamentos axiais diferenciais (em mm).

Pavimento	Encurtamento diferencial (P14-P9) mm
1	1
2	0
3	1
4	0
5	1
6	1
7	*

* não foi possível a obtenção das cotas em função de interferências construtivas.

Fonte: Elaborado pela autora.

O encurtamento axial diferencial dos pilares P9 e P14 no 1º pavimento equivale ao trecho desses pilares que vai do subsolo 1 até o pavimento condominial. Na sequência, do condominial até o primeiro tipo, do primeiro ao segundo tipo, do segundo ao terceiro tipo, do terceiro ao quarto tipo, do quarto ao quinto tipo, e, por fim, do quinto ao sexto tipo.

Pela análise da Tabela 32 e da Tabela 33, é possível constatar que os valores encontrados estão dentro da faixa de precisão do equipamento topográfico utilizado. Sendo assim, não se pode considerar que houve encurtamentos axiais, tanto absolutos quanto diferenciais.

Na Tabela 34, estão apresentados os recalques que foram obtidos pelas medições.

Tabela 34 – Recalques dos pilares P9 e P14 (em mm).

Pilares	Recalque medido (mm)
9	5
14	5

Fonte: a autora

d) Simulação numérica sequencial construtiva da edificação até a fase de acompanhamento da obra, para comparação dos deslocamentos (encurtamentos) obtidos numericamente com as medições realizadas.

A edificação em questão foi aqui simulada no *software* TQS até o nível onde foram realizadas as medições, para se ter uma ideia dos encurtamentos obtidos numericamente. Para isso, procurou-se reproduzir da maneira mais próxima possível as condições adotadas em obra.

As dimensões dos elementos estruturais foram as mesmas utilizadas no projeto estrutural. Os pilares foram considerados rotulados nas fundações. Para essa análise, foi adotado um f_{ck} variável com o tempo. Foi utilizado o valor de f_{ck} diferenciado por planta, cujos valores de resistência são de 40 MPa até o 5º pavimento; após, a resistência foi reduzida para 30 MPa. Considerou-se um ciclo de concretagem de 14 dias entre os pavimentos e, para o traçado da curva de evolução da resistência do concreto com a idade, foi utilizado o cimento CII, mesmo cimento utilizado na obra.

Para a análise dessa estrutura, foi utilizado o módulo efeito incremental do *software* TQS, que, automaticamente, considera os incrementos de carga e permite configurar o momento de atuação dessas cargas.

Basicamente, até o ciclo de medições, a edificação estava sujeita ao carregamento de peso próprio e à carga construtiva.

O Quadro 14 ilustra o esquema de carregamento configurado.

Quadro 14 – Resumo das estruturas e carregamentos do modelo sequencial construtivo da edificação.

Esquema	Carregamento	Descrição do carregamento
1	1	$PP_1 + CC_1$
2	2	$PP_2 + CC_2$
3	3	$PP_3 + CC_3$
4	4	$PP_4 + CC_4$
5	5	$PP_5 + CC_5$
6	6	$PP_6 + CC_6$
7	7	$PP_7 + CC_7$
8	8	$PP_8 + CC_8$

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 35, estão apresentados os encurtamentos axiais absolutos, obtidos para os pilares P9 e P14 pela simulação numérica. Já na Tabela 36, encontram-se os encurtamentos axiais diferenciais.

Tabela 35 – Encurtamentos axiais absolutos (em mm).

Pavimentos	Pilar 9	Pilar 14
1	0,46	0,44
2	0,76	0,74
3	0,77	0,99
4	0,72	0,97
5	0,71	1,04
6	0,64	0,97
7	0,49	0,78
8	0,28	0,45

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 36 – Encurtamentos axiais diferenciais (em mm).

Pavimentos	P14-P9
1	-0,02
2	-0,02
3	0,22
4	0,25
5	0,33
6	0,33
7	0,29
8	0,17

Fonte: Elaborado pela autora.

Pela análise das duas tabelas, observa-se que os valores encontrados numericamente são de ordem inferior a 1mm, exceto para o pilar 14 no 5º pavimento. Isso demonstra que, para o carregamento de peso próprio e construtivo, que era o carregamento a que a obra estava sujeita, a ordem de grandeza é pequena, o que comprova que os equipamentos topográficos utilizados não conseguiriam mensurar tais valores, em função de sua faixa de precisão.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho abordou a análise estrutural das sequências de construção e carregamento em edifícios de múltiplos pavimentos em concreto armado.

Diante dos levantamentos e das análises realizadas, percebe-se que há uma preocupação com a utilização de modelos estruturais simplificados (que não levam em consideração a sequência de construção e carregamento da estrutura), uma vez que esses modelos demasiadamente simplificados afastam-se do real comportamento da estrutura e podem apresentar resultados discrepantes.

A partir dos resultados obtidos, foi alcançada uma série de conclusões em relação à consideração da análise sequencial construtiva em edificações de concreto armado.

Quanto ao objetivo geral deste trabalho, pode-se dizer que seu escopo foi alcançado. Com base nos exemplos numéricos apresentados, pode-se afirmar, sem perda de generalidade, a necessidade de realizar a análise sequencial construtiva para a correta determinação dos esforços solicitantes nas edificações.

Além do objetivo geral, os objetivos específicos também foram alcançados. As principais conclusões obtidas estão apresentadas na sequência.

O primeiro objetivo específico analisou a diferença entre os processos de análise convencional e sequencial construtivo, por meio de uma análise numérica que confrontou diretamente os dois processos de análise. Quanto à principal diferença entre os processos de análise abordados no trabalho, pode-se dizer que o diferencial está relacionado com a forma de computar os deslocamentos. O modelo convencional de análise, por acumular, nos andares superiores da edificação, deslocamentos inexistentes, faz com que o deslocamento diferencial cresça ao longo da altura da edificação, atingindo seu valor máximo no topo desta. Já para o procedimento sequencial construtivo, os deslocamentos diferenciais máximos se verificam aproximadamente à meia altura da edificação. A existência de deslocamentos diferenciais verticais acentua a diferença entre os dois procedimentos de análise.

Quanto ao segundo objetivo específico, que comparou os deslocamentos e os esforços nos elementos estruturais de edifícios em concreto armado pela análise sequencial construtiva e pela análise convencional, essa meta foi concluída a partir da realização de análises de estruturas de diferentes números de pavimentos, com dimensões e formas variadas, além de parâmetros variados.

Os resultados deixam claro que, ao levar em conta o fato de as ações serem introduzidas de forma sequencial na estrutura, quando acompanhado o desenvolvimento de sua construção, são encontrados valores de esforços solicitantes e deslocamentos diferentes daqueles obtidos convencionalmente.

Em todas as estruturas aqui analisadas, verificou-se diferença entre os resultados obtidos por intermédio da análise sequencial construtiva em comparação com aqueles obtidos pelo procedimento convencional de análise.

Com relação aos deslocamentos diferenciais verticais, medidos nos nós superiores de pilares de um mesmo andar, pode-se afirmar que, quando ocorrem, esses deslocamentos são informação segura de que também se verificam diferenças entre os esforços obtidos pelos dois procedimentos.

Um fator importante que pôde ser observado na análise sequencial construtiva é a diferença nos esforços finais de flexão das vigas, justificada pela existência dos deslocamentos axiais diferenciais entre pilares adjacentes, já que alguns deles absorvem maior esforço axial do que outros. Nos últimos andares do edifício, a necessidade da consideração da análise sequencial construtiva fica mais evidente para o cálculo dos deslocamentos e esforços nas vigas, uma vez que, se forem consideradas as etapas construtivas, os deslocamentos nos apoios das vigas serão menores, provenientes apenas da montagem dos últimos andares e não provenientes do cálculo do edifício como um todo.

Em se tratando de dimensionamento dos elementos estruturais, quando realizado pela análise sequencial construtiva, este ocorre de uma forma mais racional, por meio de esforços mais próximos dos reais, em razão de que o modelo procura representar, do modo mais próximo possível, o comportamento da edificação durante o uso e a construção.

Pelas análises realizadas, não se pode afirmar que a análise sequencial construtiva gere estruturas mais econômicas, uma vez que ocorre uma redistribuição de esforços. Mas fica evidente que existem diferenças quando a estrutura é dimensionada por um ou outro modelo de análise.

Ainda, finalizando o segundo objetivo específico, verificou-se que, feito o cálculo sequencial de uma estrutura, tem-se o histórico dos esforços em cada elemento estrutural ao longo das etapas de construção e carregamento. Durante alguma etapa intermediária, os esforços desenvolvidos nos elementos podem, inclusive, apresentar troca de sinal em relação aos esforços finais, conforme pôde ser observado, vindo a acarretar possíveis danos estruturais.

Constata-se, dessa maneira, que a pesquisa dos esforços intermediários deve ser efetuada, e sua importância aumenta na medida em que se considera uma maior parte do carregamento nas etapas de construção.

Quanto à utilização do módulo efeito incremental, verificou-se que, embora facilite as análises, esse módulo não permitiu a investigação dos esforços intermediários.

Com relação ao terceiro objetivo específico, que monitorou o encurtamento axial de pilares de uma edificação real, o propósito foi alcançado parcialmente, visto que não foi possível realizar o monitoramento até a fase final da construção. Esse fato acabou não permitindo que a comparação entre os deslocamentos medidos e os numéricos fosse realizada para toda a edificação. Isso ocorreu devido a interferências construtivas, que não permitiram acesso aos pontos monitorados. Mesmo assim, pode-se verificar que os equipamentos topográficos utilizados apresentam um grau de precisão baixo para medir esses encurtamentos.

Por fim, pelo fato de calcular a estrutura de forma gradativa, a análise sequencial construtiva deve ser realizada, pois tal análise sempre acaba estimulando uma maior interação entre aquilo que é feito no escritório de projetos e no canteiro de obras. Isso porque, para o calculista, quanto mais informação da obra ele conseguir colocar no seu projeto, mais refinados serão os resultados que ele irá conseguir e mais próximo da realidade seu modelo estrutural estará.

Em edifícios altos, conforme constatado neste estudo, o efeito deste tipo de análise é ainda mais relevante.

Diante dos resultados obtidos neste trabalho, verificou-se a necessidade de mais pesquisas na área e, nesse contexto, algumas outras sugestões para trabalhos futuros foram avaliadas, tais como:

- a) Aprofundar as simulações numéricas considerando o efeito do vento atuando nas etapas intermediárias de construção e verificar sua relevância nos resultados finais, pois, no presente trabalho, essas cargas são adicionadas à estrutura apenas quando totalmente construída.
- b) Considerar o efeito do escoramento de um pavimento superior sobre um inferior.
- c) Realizar o dimensionamento da estrutura para as etapas intermediárias, ou seja, as etapas desenvolvidas durante a fase de construção.
- d) Dar prosseguimento à investigação de encurtamentos axiais de pilares em edificações durante a fase de construção, utilizando outras ferramentas para acompanhamento e controle.

REFERÊNCIAS

ALVARADO, Y. A.; CALDERON, P. A.; ADAM, J. M.; PAYÁ-ZAFORTEZA, I. J.; PELLICER, T. M.; PALLARÉS, F. J.; MORAGUES, J. J. An experimental study into the evolution of loads on shores and slabs during construction of multistorey buildings using partial striking. **Engineering Structures**, v. 31, n. 9, p. 2132-2140, 2009.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 347**: Guide for Shoring/Reshoring of Concrete Multistorey Buildings. USA: 2005.

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 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13133**: Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro: 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15696**: Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto– Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos. Rio de Janeiro: 2009.

AYOUB, H.; KARSHENAS, S. Survey results for concrete construction live loads on newly poured slabs. **Journal of Structural Engineering**, v. 120, n. 5, p. 1543-1562, 1994.

ARACHCHILAGE, D. I. S. Differential axial shortening in high rise buildings with concrete filled tube columns. 2016. 178 f. Thesis (Doctor of Philosophy), Queensland University of Technology, Austrália, 2016.

AZKUNE, M.; PUENTE, I.; INSAUSTI, A. Effect of ambient temperature on the redistribution of loads during construction of multi-storey concrete structures. **Engineering Structures**, v. 29, n. 6, p. 933-941, 2007.

CALDERÓN, P. A.; ALVARADO, Y. A.; ADAM, J. M. A new simplified procedure to estimate loads on slabs and shoring during the construction of multistorey buildings. **Engineering Structures**, v. 33, n. 5, p. 1565-1575, 2011.

CARVALHO, B. A. **Análise comparativa pelo método dos elementos tridimensionais clássicos e evolutivos do sistema estrutural de um edifício alto em concreto armado**. 2004. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

CARVALHO, F. M. **Efeito do carregamento precoce na segurança das estruturas de concreto**. 1997. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

CHAKRABARTI, S. C.; NAYAK, G. C.; AGARWALA, S. K. Effect of sequence of construction in the analysis of multistoreyed building frame. **Building and Environment**, v. 13, [s.n], p.1-6, 1978.

CHOI, C. K.; KIM, E. D. Multistory frames under sequential gravity loads. **Journal of Structural Engineering**, v. 111, n. 11, p. 2373-2384, 1985.

CHOI, S. W.; KIM, Y.; KIM, J. M.; PARK, H. S. Field Monitoring of Column Shortenings in a High-Rise Building during Construction. **Sensors**, v. 13, n. 11, p.14321-14338, 2013.

COELHO, A. O. L. **Influência das etapas de construção e carregamento na análise de pórticos planos em edifícios altos**. 2003. 255 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

DUAN, M. Z.; CHEN, W. F. Improved Simplified Method for Slab and Shore Load Analysis during Construction. **Project Report CE-STR-95-24**, Purdue University, West Lafayette, Ind, 1995.

DUBEY, N.; SONPAROTE, R. S.; KUMAR, R. Effect of construction sequence analysis on seismic Performance of Tall Buildings. **Journal of Civil Engineering and Environmental Technology**, v. 2, n. 11, p. 44-49, 2015.

ELDUKAIR, B. A.; AYYUB, B. M. Analysis of recent U.S. structural and construction failures. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 5, n. 1, p.57-73, 1991.

EL-SHAHHAT, A. M.; CHEN, W. F. Improved analysis of shore-slab interaction. **ACI Structural Journal**, v. 89, n. 5, p. 528-537, 1992.

EPAARACHCHI, D. C.; STEWART, M. G.; ROSOWSKY, D. V. Structural Reliability of Multistory Buildings during Construction. **Journal of Structural Engineering**, v. 128, n. 2, p. 205-213, 2002.

FANG, D. P.; GENG, C. D.; ZHU, H. Y.; LIU, X. L. Floor load distribution in reinforced concrete buildings during construction. **ACI Structural Journal**, v. 98, n. 2, p. 149-156, 2001.

DONGPING, F.; HAIFENG, XI.; XIAOMING, W.; CHUANMIN, Z.; TINGHENG, Z. Load Distribution Assessment of Reinforced Concrete Buildings During Construction with Structural Characteristic Parameter Approach. **Tsingua Science and Technology**, v. 14, n. 6, p. 746-755, 2009.

FREITAS, A. A. **Situações críticas no projeto de edifícios de concreto armado submetidos a ações de construção**. 2004. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

GAZETA ONLINE. **Diário de São Paulo**. 2009. Disponível em: <http://oglobo.globo.com/brasil/laje-cai-em-obra-do-shopping-sp-market-3137959>. Acesso em: 14 out. 2016.

GORZA, L. S. **Análise incremental construtiva de edifícios metálicos de andares múltiplos usando o método dos elementos finitos**. 2000. 235 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2000.

HADIPRIONO, F. C.; WANG, H. K. Analysis of Causes of Falsework Failures in Concrete Structures. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 112, n. 1, p. 112-121, 1986.

HARSHA, B. S.; VIKRANTH, J. Study and Comparison of Construction Sequence Analysis With Regular Analysis by using Etabs. **International Journal of Research Sciences and Advanced Engineering**, v.2, n. 8, p. 218-227, 2014.

JÚNIOR, O. G. H. **Interação solo-estrutura para edifícios de concreto armado sobre fundações diretas**. 1998. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

KANG, S.; CHOI, J.; KIM, H.; KIM, I. Prediction and Compensation of Column Shortening for Bitexco Fincancial Tower. In: CTBU World Conference. Korea: 10-12, OCT. 2011. Anais... p. 811-818.

KIM, H. S.; JEONG, S. H.; SHIN, S. H.; PARK, J. P. Simplified column shortening analysis of a multi-storey reinforced concrete frame. **The Structural Design of Tall and Special Buildings**, v. 21, n. 6, p. 405-415, 2012.

KIM, H. S.; SHIN, S. H. Column Shortening Analysis with Lumped Construction Sequences. **Procedia Engineering**, v. 14, [s.n], p. 1791-1798, 2011.

KRIPKA, M. **Análise incremental construtiva de edificações**. 1990. 139 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

KRIPKA, M.; CHAMBERLAIN, Z. P. **Análise estrutural construtiva de edificações com consideração da não linearidade geométrica**. In: Jornadas Sulamericanas. Montevideo: 15-19, NOV. 1993. Anais... p. 31-37.

KRIPKA, M.; EL DEBS, A. L. C. **Evolução da resistência do concreto na fase de construção de edifícios**. In: Congresso Ibero Latino Americano sobre métodos computacionais para engenharia. Curitiba: 29 NOV-1 DEZ. 1995. Anais... p. 392-400.

KRIPKA, M.; SORIANO, H. L. **Simulação das sequencias de construção e carregamento em edificações**. In: XIV Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo: 1-3, Dez. 1992. Anais... p. 83-88.

KWAK, H. G.; KIM, J. K. Time-dependent analysis of RC frame structures considering construction sequences. **Building And Environment**, v. 41, n. 10, p. 1423-1434, 2006.

LEE, H. M.; LIU, X. L.; CHEN, W. F. Creep Analysis of Concrete Buildings during Construction. **Journal of Structural Engineering**, v. 117, n. 10, p. 3135-3148, 1991.

LIU, X.; CHEN, W. F.; BOWMAN, M. D. Construction Load Analysis for Concrete Structures. **Journal of Structural Engineering**, v. 111, n. 5, p. 1019-1036, 1985.

MARÍN, S. M. M. **Estudio de la Influencia de la Secuencia de Cargas de Construcción em Edificaciones Irregulares en Altura**. 2008. 127 f. Proyecto de Título (Grado de Ingeniero Civil), Universidad del Bio-Bio, Concepción, 2008.

MATEUS, F. M. **Influência das deformações axiais dos pilares e das etapas de construção e carregamento na análise estrutural de edifícios altos com lajes lisas**. 2003. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

MENON, N. V.; NOGUEIRA, R. S. Análise incremental em pórticos de edifícios altos em concreto armado. **Science e Engineering Journal**, v. 24, n.1, p. 79-88, 2015.

MOLINA, I. G. **Estudio de la Evolucion de cargas em forjados y estructuras auxiliares de apuntalamiento durante lá construcción de edificios de hormigón in situ mediante procesos de cimbrado, clareado y descimbrado de plantas consecutivas**. 2012. 330 f. Tesis (Doctoral), Universitat Politecnica de Valencia, 2012.

MORAGASPITIYA, P.; THAMBIRATNAM, D.; PERERA, N.; CHAN, T. A numerical method to quantify differential axial shortening in concrete buildings. **Engineering Structures**, v. 32, n. 8, p. 2310-2317, 2010.

MOSSOLAM, K. H.; CHEN, W. F. Determining shoring loads for reinforced concrete construction. **ACI Structural Journal**, v. 88, n. 3, p. 340-350, mai-jun. 1991.

NEGREIROS, L. G. S. **Análise inicial da influência do sistema de escoramento no comportamento das estruturas de edifícios de concreto armado durante a fase construtiva**. 2010. 93 f. Trabalho de conclusão de curso (Grau de Engenheiro Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

O GLOBO. **Diário de São Paulo**. 2009. Disponível em: <http://oglobo.globo.com/brasil/laje-cai-em-obra-do-shopping-sp-market-3137959>. Acesso em: 14 out. 2016.

PATHAN, K. M.; ALI, S. W.; KHAN, H. T.; MIRZA, M. S.; WASEEM, M.; ZUBAIR, S. Construction Stage Analysis of RCC Frames. **International Journal of Engineering e Technology**, v. 2, n. 3, p. 54-58, 2014.

PRADO, J. F. M. A. **Estruturas de edifícios em concreto armado submetidas a ações de construção**. 1999. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

PRADO, J. F. M. A.; CORRÊA, M. R. S.; RAMALHO, M. A. A new procedure for the analysis of construction loads in multistory reinforced concrete structures. **The Structural Design Of Tall And Special Buildings**, v. 12, n. 4, p. 293-315, 2003.

PUC-RIO, FTOOL. Disponível em: <http://www.alis-sol.com.br/Ftool/>. Acesso em: 25 jul. 2017.

ROCHA, J. M. C. **Encurtamento axial diferencial de pilares e núcleos de edifícios altos**. 2016. 170 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas), Universidade do Porto, Portugal, 2016.

ROQUE, D. S. **Análise da Influência do Faseamento Construtivo em Estruturas Porticadas de Betão**. 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas), Universidade do Porto, Portugal, 2014.

R7. **Diário de São Paulo**. 2009. Disponível em: <http://noticias.r7.com/sao-paulo/apos-desabamento-engenheiro-critica-jeito-brasileiro-de-construir-deveriamos-ter-mais-acidentes-30082013>. Acesso em: 14 out. 2016.

SANTOS, H. C. **Análise de Estruturas de Concreto sob o efeito do tempo: Uma abordagem consistente com consideração da viscoelasticidade, da plasticidade, da fissuração, da protensão e das etapas construtivas**. 2006. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SANTOS, M. F. L. O.; RIBEIRO, P. M. V. **Programa para análise dos efeitos construtivos e fluência em estruturas reticuladas**. In: Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. Rio de Janeiro: 22-25, NOV. 2015. Anais... p. 1-21.

SILVA, F. J. B. **Análise comparativa pelo método dos elementos finitos de modelos tridimensionais de um edifício alto em concreto armado com sistema estrutural tubular e núcleo central**. 2006. 307 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

SIMAVORIAN, D. **Análise do efeito do escoramento no comportamento de lajes de betão armado**. 2015. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

SISTEMA topoGRAPH 98 SE 1998 - 2000 char Pointer Informática.

SOARES, R. A. C. **Análise Sequencial Construtiva de edifícios de múltiplos andares em aço**. **Revista Especialize On-line**, v. 1, n. 10, p. 1-41, 2015.

STIVAROS, P. C.; HALVORSEN, G. T. Shoring/Reshoring operations for multistory buildings. **ACI Structural Journal**, v. 87, n. 5, p. 589-596, 1990.

TQS Informática LTDA. SISTEMAS CAD/TQS PARA WINDOWS – Versão 19, São Paulo, 2017.

VAFAI, A.; GHABDIAN, M.; ESTEKANCHI, H. E.; DESAI, C. S. Calculation of creep and shrinkage in tall concrete buildings using nonlinear sataged construction analysis. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 10, n. 4, p. 409-426, 2009.

VIVACQUA, M. A. C. S. **Análise do efeito do escoramento de um pavimento superior sobre lajes inferiores, para lajes em concreto armado moldado “in loco”**. 2009. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

WILSON, E. L.; CHOI, C. K.; CHUNG, H. K.; LEE, D. G. Simplified Building Analysis with Sequential Dead Loads-CFM. **Journal of Structural Engineering**, v. 118, n. 5, p. 944-954, 1992.