

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Guilherme Kohut Martinbiancho

**A INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO NA
ESTRUTURA DE CUSTOS DE UMA EDIFICAÇÃO
COMERCIAL TÍPICA**

Porto Alegre

Setembro de 2022

GUILHERME KOHUT MARTINBIANCHO

**A INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO NA
ESTRUTURA DE CUSTOS DE UMA EDIFICAÇÃO
COMERCIAL TÍPICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Civil

Orientador: João Ricardo Masuero

Porto Alegre

Setembro de 2022

GUILHERME KOHUT MARTINBIANCHO

**A INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO NA
ESTRUTURA DE CUSTOS DE UMA EDIFICAÇÃO
COMERCIAL TÍPICA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, Setembro de 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. João Ricardo Masuero (UFRGS)

Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Prof. Roberto Domingo Rios (UFRGS)

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Eduardo Luis Isatto (UFRGS)

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu orientador, João Ricardo Masuero, por toda dedicação e conhecimentos transmitidos. Sua sabedoria, humildade e singular didática serão referências para mim durante toda minha carreira e vida. A todos os outros professores que contribuíram para a minha formação, meu muito obrigado é pouco.

Agradeço a meus pais, por todas as oportunidades que me proporcionaram durante esta caminhada. Agradeço a meus amigos, que fizeram dela única e memorável. Agradeço a meu irmão, que me apoia incondicionalmente. Agradeço a meus tios e avós, aos que estão e aos que não estão mais aqui. Estes – enquanto engenheiros, professores, advogados e arquitetos – contribuíram irretocavelmente para a minha formação, cada um de sua maneira.

Agradeço a Júlia, minha namorada, o amor da minha vida. Agradeço a minha sogra Adriana, que, generosamente, concedeu-me sua licença do *Microsoft Office* de forma que me há permitido redigir este trabalho. Agradeço a meu sogro, Antônio Augusto, pela parceria e companheirismo, incessantes desde que o conheci. E a meu cunhado, João Pedro, que sempre esteve ao meu lado nos momentos importantes, os tornando mais felizes por lá estar.

Tudo vale a pena quando a alma não é pequena.

Fernando Pessoa

RESUMO

A análise de custos para empreendimentos de engenharia é fundamental. Este trabalho se propõe a analisar os efeitos da resistência do concreto e do aumento de dimensões de elementos estruturais nos custos de uma edificação comercial típica. Os concretos estudados são os do Grupo I, com resistências características entre 25 e 50MPa. Ao longo de todas as análises, três alturas foram contempladas: 5, 8 e 16 pavimentos. As análises foram separadas em três etapas. Em um primeiro momento, cada modelo foi otimizado para contemplar o menor volume de concreto possível em cada componente estrutural, avaliando-se o impacto da resistência do concreto nos quantitativos e consequentes custos para as estruturas. Após, foram consideradas seções transversais maiores que as mínimas para a resistência que apresentou maiores economias, 40 MPa. Verificou-se o impacto nos custos de cada um dos elementos estruturais independentemente, bem como o impacto do aumento combinado de seções. Em uma terceira e última etapa, tentou-se obter a solução mais vantajosa economicamente através de duas resistências diferentes: 50 MPa para pilares, e 25 MPa para lajes e vigas. Foram analisados, ao todo, 45 modelos, orçados a partir do SINAPI. Como conclusão, o aumento adequado da resistência de concreto, bem como das seções dos elementos construtivos, pode implicar na redução de custos para edificações, advindos principalmente da economia em volume de aço utilizado – este que é o material mais representativo nos custos das edificações na conjuntura econômica atual. Em alguns casos, o aumento dimensional proporciona redução de custos, sobretudo quando em lajes e vigas, elementos dimensionados à flexão. Já pilares são os maiores beneficiados pelo aumento da resistência à compressão de concreto, que se traduz em economia de custos pela redução no volume utilizado. Nota-se grande sensibilidade no critério de dimensionamento limitante conforme a altura da edificação é elevada, sendo estruturas mais altas governadas principalmente pela estabilidade global ou limitações de deslocamentos horizontais. Tendo em vista obter uma composição de custos mais vantajosa para as edificações, conclui-se então que é necessário adequar o arranjo resistência-dimensões conforme a altura da estrutura é variada.

Palavras-chave: Custos estruturais de uma edificação. Resistência do Concreto. Estabilidade global.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema geométrico para desaprumo.....	21
Figura 2: Planta do pavimento tipo da edificação	27
Figura 3: Esquema de simulações estudadas	35
Figura 4: Curvas de interpolação de custo – 5 pavimentos	36
Figura 5: Curvas de interpolação de custo – 8 pavimentos	36
Figura 6: Curvas de interpolação de custo – 16 pavimentos	37
Figura 7: Efeitos de segunda ordem – C25, 16 pavimentos	45
Figura 8: Custo relativo vs. Número de pavimentos	46
Figura 9: Esquema de simulações estudadas – custos (em R\$ milhares)	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Exemplo de composição de custo - concretagem de pilares.....	17
Quadro 2: Deslocamentos horizontais limites para aceitabilidade sensorial.....	23
Quadro 3: Deslocamentos horizontais limites para cada altura simulada	23
Quadro 4: Possibilidades para seções dos elementos estruturais.....	30
Quadro 5: Principais itens de custo utilizados	31
Quadro 6: Estimação de custo para concretagem	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coeficientes de arrasto para cada altura simulada.....	28
Tabela 2: Quantitativos – primeira análise	38
Tabela 3: Quantitativos por pavimento – primeira análise	38
Tabela 4: Custos (R\$) totais por serviço – primeira análise	39
Tabela 5: Custos (R\$) por serviço por pavimento – primeira análise	39
Tabela 6: Representatividade de custos – primeira análise	40
Tabela 7: Resumo de custos (R\$) totais e MO – primeira análise.....	40
Tabela 8: Resumo de custos (R\$) totais por pavimento – primeira análise.....	41
Tabela 9: Resumo de custos (R\$) por pavimento – pilares vs. ligas + lajes.....	41
Tabela 10: Variação da taxa de armadura (ρ) entre pavimentos.....	44
Tabela 11: Coeficiente Gama Z e deslocamentos horizontais máximos	45
Tabela 12: Quantitativos – segunda análise.....	48
Tabela 13: Quantitativos por pavimento – segunda análise	49
Tabela 14: Custos (R\$) totais por serviço – segunda análise	50
Tabela 15: Custos (R\$) por serviço por pavimento – segunda análise.....	51
Tabela 16: Representatividade de custos – segunda análise.....	52
Tabela 17: Resumo de custos (R\$) totais e MO – segunda análise	53
Tabela 18: Resumo de custos (R\$) totais por pavimento – segunda análise	53
Tabela 19: Resumo de custos (R\$) por pavimento – pilares vs. ligas + lajes.....	54
Tabela 20: Consumo de aço (kg) por volume de concreto (m^3)	59
Tabela 21: Quantitativos – terceira análise.....	60
Tabela 22: Quantitativos por pavimento – terceira análise	60
Tabela 23: Custos (R\$) totais por serviço – terceira análise.....	60
Tabela 24: Custos (R\$) por serviço por pavimento – terceira análise.....	61
Tabela 25: Representatividade de custos – terceira análise.....	61
Tabela 26: Resumo de custos (R\$) por pavimento – pilares vs. ligas + lajes.....	61
Tabela 27: Variação de custo total para os métodos analisados	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO	12
1.2	ESCOPO E LIMITAÇÕES	13
1.3	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	SISTEMA NACIONAL DE PESQUISAS DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL	15
2.2	CRITÉRIOS GERAIS DIMENSIONANTES DE UMA EDIFICAÇÃO	17
2.2.1	<i>Solicitações e efeitos locais</i>	17
2.2.2	<i>Efeitos de 2ª ordem e estabilidade global</i>	19
2.2.3	<i>Deslocamentos horizontais</i>	22
3	METODOLOGIA.....	24
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	24
3.2	O <i>SOFTWARE</i> TQS	25
3.3	PLANTA E GEOMETRIA DA ESTRUTURA	26
3.4	CARGAS	27
3.5	REFINAMENTO ESTRUTURAL	29
3.6	CÁLCULO DE CUSTO DA EDIFICAÇÃO	31
3.7	APLICAÇÃO	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1	A RESISTÊNCIA DE CONCRETO MAIS ECONÔMICA.....	36
4.2	PRIMEIRA ANÁLISE: DIMENSIONAMENTO SOB SEÇÕES MÍNIMAS	37
4.2.1	<i>Quantitativos e estimativas de custo</i>	37
4.2.2	<i>Análise</i>	41
4.3	SEGUNDA ANÁLISE: AUMENTO DE DIMENSÕES	47
4.3.1	<i>Quantitativos e estimativas de custo</i>	47
4.3.2	<i>Análise</i>	54
4.4	TERCEIRA ANÁLISE: DIFERENTES RESISTÊNCIAS ENTRE ELEMENTOS ESTRUTURAIS	60
4.4.1	<i>Quantitativos e estimativas de custo</i>	60
4.4.2	<i>Análise</i>	61
4.5	COMPARATIVO ENTRE SOLUÇÕES	63
5	CONCLUSÃO.....	65
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

A análise de custos para empreendimentos de engenharia é fundamental. Uma vez o projeto apresentando viabilidade técnica, a decisão sobre qual alternativa estrutural conceber é predominantemente influenciada pelos custos inerentes a cada uma das opções.

A resistência à compressão do concreto é um fator determinante nesta análise de custos, seja por sua influência no volume de material de concreto e aço necessários para anteder as normativas vigentes, seja na sua influência na demanda de mão-de-obra requerida para a realização da edificação. Sabe-se que maiores resistências à compressão do concreto e, conseqüentemente, maior módulo de deformação são acompanhadas de economias no que tange ao volume de concreto e área de fôrmas necessários para a execução da estrutura, bem como numa redução das cargas permanentes. Entretanto, essa redução é acompanhada por um aumento da taxa de armadura e no consumo total de aço utilizado, não sendo claro o quanto desta redução de volume é revertida em redução monetária.

O orçamento de uma edificação de concreto armado é realizado em função de diversos fatores: desde o salário dos projetistas que a concebem até os acabamentos internos e externos previamente feitos à entrega ao cliente. Neste contexto, o estudo sobre não apenas a composição destes custos como também maneiras de a otimizar são fundamentais para um bom projeto de engenharia. Através de uma melhor compreensão das relações entre resistência à compressão do concreto e custos para sua implementação, uma melhor tomada de decisão relacionada a aspectos econômicos para projetos de edificações será possível. Além disto o aumento da resistência do concreto possibilita a utilização de elementos mais esbeltos, o que é traduzido em espaço útil para a edificação (DAL MOLIN; WOLF, 1990).

Estudos apresentam que edifícios mais elevados e inovadores têm sido cada vez mais necessários (OLIVEIRA et al, 2013). Para estruturas de grandes alturas, acima de 20 pavimentos, variar a resistência à compressão do concreto à medida que se eleva sua altura pode proporcionar economias de custo quando comparado com modelos de

resistência invariável (SANTOS et al., 2016). Ou seja, a não otimização na escolha da resistência do concreto acarreta custos desnecessários para uma obra de engenharia

BERNARDO (2011) observa que menores deformações são originadas em edificações que utilizam maiores resistências (f_{ck}) de concreto. Tais reduções de deslocamentos, conseqüentes de maior rigidez para elementos estruturais, colaboram para verificações a estado limite de serviço (ELS), que garante o conforto e durabilidade da edificação durante sua utilização.

Os elementos estruturais que possuem maior relevância nos custos estruturais de uma edificação são pilares, vigas e lajes. Estes todos são concebidos a partir de materiais básicos – principalmente concreto, fôrmas e aço – e serviços de mão-de-obra e locação de equipamentos. Denominaremos tais elementos – os pilares, vigas e lajes – como a estrutura básica de custos de uma edificação. Sabendo disto, torna-se possível a quantificação de seu custo estrutural a partir do mapeamento de volumes (de concreto, fôrmas e aço) necessários e seus preços de mercado.

À medida que é elevada a resistência do concreto utilizado para os elementos construtivos (pilares, vigas e lajes), o volume de concreto necessário para a totalidade da edificação é reduzido, com uma conseqüente redução nas cargas permanentes, e nos custos de mão-de-obra para os vários serviços de execução relacionados, proporcionais ao volume de material utilizado, revelando ao que poderia ser classificado como uma redução de custos de segunda ordem. No entanto, a redução das dimensões frequentemente está associada ao aumento das taxas de armadura. Sabendo que o custo de concreto aumenta quando é requerido um material de maior resistência, encontrar o ponto ótimo que representa maior economia financeira para a edificação não é um processo trivial.

1.1 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é encontrar o ponto economicamente mais vantajoso da estrutura de uma edificação tipo de concreto armado, identificando uma relação entre resistências à compressão do concreto e os custos decorrentes do dimensionamento da estrutura com os correspondentes concretos.

1.2 ESCOPO E LIMITAÇÕES

Sempre respeitando as diretrizes das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2014), o trabalho limita-se a apresentar uma análise baseada no custo de implementação das alternativas estruturais, deixando em segundo plano quaisquer avaliações de aspectos legais, ambientais e de limitação de materiais: o trabalho tomará como suposição que todas as alternativas apresentadas são possíveis de serem implementadas. Para fins de simplificação e por conta da complexidade de mensuração de certos quantitativos e custos decorrentes da otimização de alternativas estruturais (e.g. requadros de alvenaria, emendas de armaduras, utilização de frisos e revestimentos), estes não foram contemplados durante as análises, assumindo-se que todos são factíveis e não impactam significativamente o andamento da construção.

O trabalho apresentará uma comparação de custo entre todas as alternativas estruturais mencionadas pelo autor, e não sobre todas as alternativas estruturais que existem. Para as análises, foram utilizadas apenas resistências de concreto pertencentes ao grupo I, segundo classificação da NBR8953. Não foram quantificados custos ou benefícios resultantes de uma maior ou menor ocupação dos ambientes arquitetônicos pela estrutura.

O dimensionamento de todas as estruturas analisadas neste trabalho foi feito utilizando o programa computacional TQS Versão UniPro 21.18. As rotinas de dimensionamento do referido programa foram consideradas a priori como corretas, e o programa utilizado como ferramenta para obter os quantitativos de materiais utilizados em cada estrutura, respeitando-se, através dos parâmetros de controle do programa e de suas mensagens de aviso e erro, as limitações e prescrições das normas pertinentes (NBR6118:2014, NBR6120:2019 e NBR6123:1988).

Neste trabalho, a fundação das edificações foi considerada infinitamente rígida, com a estrutura engastada ao nível do solo. Somente foram consideradas cargas estáticas, sem efeitos dinâmicos ou oscilatórios. Os dimensionamentos foram realizados a partir de análises elásticas lineares de primeira ordem, com uso de correções e majorações preconizadas pela NBR6118:2014 para considerar não linearidades físicas e geométricas. Somente foram dimensionados os elementos estruturais lajes (incluindo escadas), vigas e pilares. Cortinas, muros de arrimo, paredes portantes ou outros elementos estruturais não

foram considerados no estudo. As edificações analisadas foram consideradas como de estrutura independente das vedações verticais.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O trabalho inicia por uma revisão bibliográfica elencando os principais autores – através de seus principais resultados e conclusões – e normas – no que tange os critérios de dimensionamento de estruturas de concreto armado – utilizados como referência para o estudo em questão. Também, neste capítulo é contextualizado o SINAPI, utilizado como o referencial teórico para o cálculo de custos das edificações simuladas. Após, é delineado a metodologia aplicada no trabalho, desde o sistema de cálculo utilizado – *software* TQS –, à planta das estruturas estudadas e às cargas consideradas, bem como as prioridades de dimensionamento que baseiam o desenrolar das simulações. Os resultados são exibidos no próximo capítulo, para as 3 análises realizadas, onde apresentam-se tabelas resumo de quantitativos e custos para cada modelo gerado, estas que precedem suas respectivas análises e discussões. Finalmente, o trabalho é concluído ante reflexão sobre cada um dos horizontes apurados, posteriormente à comparação deles entre si.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A resistência do concreto possui impacto fundamental na grande maioria das verificações realizadas durante um projeto de engenharia, sobretudo para elementos dimensionados por compressão e ao esforço cortante. Peças com maiores seções demandam mais volumes de concreto, o que resulta em maiores custos relacionados a esse material. Por outro lado, a redução de seções implica em geral em concretos de maior resistência, cujo custo unitário aumenta com a resistência, e na maior utilização de aço, principalmente para lajes e vigas, que sofrem com a restrição sobre sua altura útil e colaboração da área de concreto para manutenção de esforços fletores.

Matias (2019), analisou a influência da resistência à compressão do concreto nos quantitativos e custos de estruturas comerciais de concreto armado, visando encontrar a solução mais vantajosa economicamente para o cenário econômico de então. Para tanto, foram simuladas edificações dimensionadas sob seções mínimas para cada uma das resistências de concreto entre 25 e 90 MPa. Neste estudo, utilizou-se o *software* TQS, em sua versão estudantil, para a modelagem estrutural. Limitando-se a edificações de cinco pavimentos e estruturas de nós fixos resistentes a cargas de vento não-excêntricas, conclui-se que o concreto de 30 MPa resultou na solução mais econômica quando analisados apenas os custos de materiais para a estrutura; quando levados em conta os custos de mão-de-obra, a faixa ótima restou entre 40 e 45 MPa. O presente trabalho toma como ponto de partida os principais parâmetros que compõe este último; portanto, para fins de comparação, aspectos como a geometria da estrutura, cargas, altura de pé-direito, entre outros, foram aqui definidos de forma semelhante.

2.1 Sistema Nacional de Pesquisas de Custos e Índices da Construção Civil

O Sistema Nacional de Pesquisas de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) é um sistema orçamentário atualmente desenvolvido e controlado pela Caixa Econômica Federal (CEF) e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Implementado em 1969, ele tem como objetivo a produção de séries mensais de custos e índices para o setor da construção civil. Estes custos e índices provêm de estimativas de preço de materiais, máquinas, equipamentos e mão-de-obra para os diversos processos atrelados a obras de infraestrutura, saneamento e habitação. Suas tabelas referenciais são

utilizadas principalmente para orçamentação de obras financiadas com recursos públicos (servindo de base para licitações, por exemplo) e possui abrangência nacional.

De maneira geral, o sistema cria unidades de serviço, cada uma relacionando e quantificando todos os insumos e/ou de composições auxiliares empregados para sua execução. Os insumos são organizados em famílias ditas homogêneas. Para cada uma, é selecionado o insumo mais relevante como insumo representativo, sendo os demais da mesma família denominados representados. O preço dos insumos representativos é coletado mensalmente, enquanto os preços dos demais insumos são obtidos por meio da utilização de coeficientes de representatividade. A coleta é feita nas 27 capitais do país, em estabelecimentos regulares, para aquisição de uma unidade de comercialização de cada produto (Caixa Econômica Federal, 2014).

O sistema apresenta um acervo completo para embasar o custeio de edificações de engenharia civil. Identificando os custos de insumos e mão-de-obra de cada um dos itens da edificação, é possível quantificá-la em sua totalidade. Dentre os principais itens catalogados pelo SINAPI, identificam-se os seguintes para pilares, vigas e lajes:

- a) Concretagem de vigas e lajes, $f_{ck} = 20$ MPa, para lajes maciças ou nervuradas com uso de bomba em edificação com área média de lajes menor ou igual a 20 m^2 - lançamento, adensamento e acabamento. AF_12/2015;
- b) Concretagem de pilares, $f_{ck} = 25$ MPa, com uso de bomba em edificação com seção média de pilares menor ou igual a $0,25 \text{ m}^2$ - lançamento, adensamento e acabamento. AF_12/2015;
- c) Montagem e desmontagem de fôrma de viga, escoramento metálico, pé-direito simples, em chapa de madeira resinada, 2 utilizações. AF_09/2020;
- d) Armação de pilar ou viga de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço CA-50 de 6,3 mm - montagem. AF_12/2015.

O Quadro 1 apresenta um exemplo de composição de custos para o processo b) supracitado.

Quadro 1: Exemplo de composição de custo - concretagem de pilares

Concretagem de pilares, fck = 25 MPa, com uso de bomba em edificação com seção média de pilares menor ou igual a 0,25 m ² lançamento, adensamento e acabamento. AF_12/2015								
Tipo	Cód. Item	Desc. Item	Unidade	Origem de preço	Coef.	Preço Unitário	Custo total	
Insumo	1527	Concreto usinado bombeável, classe de resistência C25, com brita 0 e 1, slump = 100 +/- 20 mm, inclui serviço de bombeamento (NBR 8953)	M3	Coef. de representatividade	1,103	R\$ 463,37	R\$	511,09
Composição	88262	Carpinteiro de formas com encargos complementares	H	Coletado	0,199	R\$ 22,53	R\$	4,48
Composição	88309	Pedreiro com encargos complementares	H	Coletado	0,199	R\$ 22,79	R\$	4,53
Composição	88316	Servente com encargos complementares	H	Coletado	1,192	R\$ 18,84	R\$	22,45
Composição	90586	Vibrador de imersão, diâmetro de ponteira 45mm, motor elétrico trifásico potência de 2 cv - CHP diurno. AF_06/2015	CHP	Coef. de representatividade	0,068	R\$ 1,14	R\$	0,07
Composição	90587	Vibrador de imersão, diâmetro de ponteira 45mm, motor elétrico trifásico potência de 2 cv - CHI diurno. AF_06/2015	CHI	Coef. de representatividade	0,131	R\$ 0,35	R\$	0,04

(fonte: SINAPI, Custo de Referência e Composições – adaptado pelo autor)

2.2 CRITÉRIOS GERAIS DIMENSIONANTES DE UMA EDIFICAÇÃO

O item 10 da norma NBR 6118:2014 define como mandatórias as verificações dos elementos para Estados Limites Últimos (ELU) – que garantem a não ruína estrutural – e Estados Limites de Serviço (ELS) – relacionados ao conforto, durabilidade e boa utilização das estruturas. Dentre todas as verificações necessárias em um projeto de estrutural engenharia civil, definidas pela NBR 6118:2014, serão elencadas aqui as mais relevantes – e críticas – no que tange ao dimensionamento das estruturas estudadas neste trabalho.

Cabe lembrar que as ações implicadas pelas cargas solicitantes à estrutura estudada devem ser consideradas segundo o capítulo 11 da NBR 6118:2014. De mesma forma, as resistências, tanto à tração quanto compressão, são definidas pelo item 12 (8.2.5 e 12.3.3, respectivamente) e ponderadas pelo item 12.4 para ELU e ELS.

A dimensão limite mínima para vigas é indicada em 13.2.2 como 12 cm de largura, pilares em 13.2.3 como 19 cm (tabela 13.1 para majoração até 14 cm) e lajes como 8 cm de espessura (piso não em balanço), segundo item 13.2.4.1.

2.2.1 Solicitações e efeitos locais

Embasado nas definições de análise estrutural do capítulo 14 e partindo dos princípios estabelecidos no capítulo 16, o dimensionamento de elementos é regido pelos itens 17 e 19 da norma.

2.2.1.1 ELS

O item 17.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014) definem estados limites de serviço, sendo estes compostos principalmente por estados limites de deformação para flecha imediata e flecha diferida no tempo e estado limite de fissuração, através do controle de abertura de fissuras – verificações usuais para vigas e lajes. As flechas, sob combinação ELS, devem respeitar os limites estabelecidos na tabela 13.3 da NBR 6118:2014 – e.g. a flecha para vigas não deve ultrapassar $l/250$ para efeitos de aceitabilidade sensorial.

A armadura mínima de tração em vigas pode ser verificada, ou a partir do maior valor entre 0,15% da área de sua seção e o momento fletor mínimo (item 17.3.5.2.1), ou respeitando-se a taxa mínima estabelecida na tabela 17.3. Já seus valores máximos, juntamente com valores máximos de armadura para lajes, para as armaduras de tração e compressão somados são limitados a 4% da área de sua seção fora da zona de emendas, conforme 17.3.5.2.4.

Em lajes, os valores de armadura máxima são os mesmos que os para vigas. Ainda sob ELS, seus valores mínimos são encontrados na tabela 19.1. Concomitantemente, o dimensionamento de lajes à punção deve seguir o recomendado pela norma no item 19.5, que define as tensões solicitantes nas superfícies críticas de acordo com o tipo de elemento atuante sob a laje: pilar interno, pilar de borda ou pilar de canto.

Para pilares, a área de armadura longitudinal deve respeitar, a ELS, os limites estabelecidos em 17.3.5.3.1, resumidos pela expressão abaixo:

$$A_{s,min} = \left(0,15 \frac{N_d}{f_{yd}} \right) \leq A_s \leq 0,08 A_c = A_{s,max} \quad (1)$$

Onde:

N_d : força normal de cálculo

f_{yd} : resistência de cálculo do aço

A_c : área de concreto da seção

2.2.1.2 ELU

Para verificações de esforço cortante, agora a ELU, todos os elementos devem apresentar armadura transversal mínima definida em 17.4.1.1.1. Para determinação de armadura necessária ao longo do elemento, os itens 17.4.2.2 e 17.4.2.3 são os dois modelos de cálculo sugeridos.

Para vigas e lajes, se faz necessária a garantia de ductilidade, a ELU, pelo critério $x/d < 0,45$ (para concretos de f_{ck} menor ou igual a 50 MPa), conforme o item 14.6.4.3.

É possível que, dada certa geometria da estrutura a ser verificada, seja impossível realizar o dimensionamento dela, ou até mesmo encontrar um arranjo de barras e estribos em conformidade com o item 18 da norma. Nestes casos, deve-se tornar a geometria do elemento compatível com as solicitações nele impostas – i.e. aumentar suas dimensões –, a fim de que todos os requisitos indicados pela norma sejam atendidos.

2.2.2 Efeitos de 2ª ordem e estabilidade global

Os efeitos de 1ª ordem são caracterizados pela análise do elemento estrutural em sua configuração geométrica inicial/ideal. Quando analisado o equilíbrio da estrutura considerando as deformações – decorrentes destes primeiros efeitos –, identificam-se novos esforços no elemento, ditos de 2ª ordem; caso estes novos esforços sejam maiores que 10% dos esforços iniciais considerados, estes não podem ser desprezados (item 15.2, NBR 6118:2014). Segundo a seção 15.3 da NBR6118 (ABNT, 2014, p. 114):

“A análise estrutural com efeitos de 2ª ordem deve assegurar que, para as combinações mais desfavoráveis das ações de cálculo, não ocorra perda de estabilidade nem esgotamento da capacidade resistente de cálculo.”

Efeitos globais de 2ª ordem ocorrem devido esforços de 2ª ordem gerados por deslocamentos horizontais na estrutura. Quando analisados localmente, os eixos de vigas e pilares não se mantêm retilíneos, o que implicam em solicitações adicionais ao elemento, chamados de efeitos locais de 2ª ordem. Consequentemente, os efeitos de 2ª implicam em verificações quanto a estabilidade da edificação analisada.

Quanto a estabilidade global da estrutura, é possível classificá-la como sendo de nós fixos e nós móveis. Considera-se a estrutura de nós fixos quando os deslocamentos horizontais de seus nós são tão pequenos a ponto de consequentes efeitos de 2ª ordem serem insignificantes para a análise estrutural (item 15.4.2, NBR 6118:2014). Portanto, quando determinada a estrutura de nós fixos, pode-se dispensar os efeitos globais de 2ª ordem que nela ocorrem, tendo-se que apenas levar em consideração os efeitos locais e localizados. A NBR6118:2014 apresenta processos aproximados para classificação de uma estrutura de nós fixos. O critério de classificação utilizado por este trabalho foi o seguinte (item 15.5.3, NBR 6118:2014):

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot}}{M_{1,tot}}} < 1,1 \quad (2)$$

Onde:

ΔM_{tot} : soma de todos os momentos gerados pelas forças horizontais atuantes na estrutura (momento de tombamento);

$M_{1,tot}$: soma do produto das forças verticais pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação (obtidos na análise de 1ª ordem).

Para a análise de estabilidade global, a norma indica que o módulo de deformação secante pode ser majorado em 10% para as análises.

As estruturas classificadas como de nós fixos permitem a análise isolada de cada um de seus elementos, podendo ser analisados por métodos de 1ª ordem. Para estruturas de nós móveis, a seção 15.7.3 da norma indica reduzir a rigidez de vigas, lajes e pilares a fim de representar a não linearidade física e geométrica dos elementos, o que se torna mandatório neste caso. Também, os efeitos globais e locais de 2ª ordem devem ser levados em conta (item 15.7.1, NBR 6118:2014).

Caso os resultados das verificações supracitadas determinem uma estrutura de nós móveis, é necessário considerar esforços de 2ª ordem tanto globais quanto locais em cada um de seus elementos. Respeitando o limite de $\gamma_z < 1,3$, a norma permite determinar, aproximadamente, os esforços globais finais (1ª e 2ª ordem) a partir da majoração dos esforços horizontais atuantes por $0,95 \gamma_z$ (seção 15.7.2). Caso o coeficiente ultrapasse o

valor de 1,3, é preciso avaliar os esforços globais de segunda ordem de forma muito mais rigorosa, utilizando por exemplo o Processo P-delta. Vale destacar que o programa TQS não oferece este método de avaliação no que tange o cálculo de estabilidade global; portanto, as análises deste trabalho se limitaram a um coeficiente $\gamma_z < 1,3$.

Durante todas as verificações da edificação, deve-se considerar suas imperfeições geométricas globais e locais. Conforme a seção 11.3.3.4.1 da NBR6118:2014, o efeito de desaprumo vertical, sejam as estruturas contraventadas ou não, pode ser avaliado da seguinte maneira:

$$\frac{1}{300} \leq \theta_1 = \frac{1}{100\sqrt{H}} \leq \frac{1}{200} \quad (3)$$

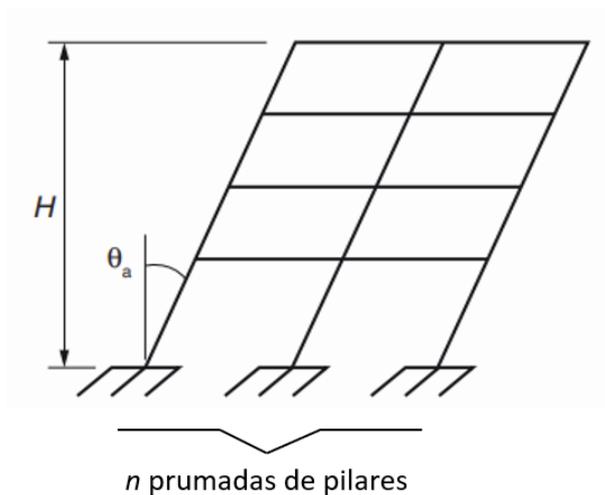
$$\theta_a = \theta_1 \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{n}}{2}} \quad (4)$$

Onde:

H : altura total da edificação

n : número de prumadas de pilares no pórtico plano

Figura 1: Esquema geométrico para desaprumo



(fonte: item 11.3.3.4.1, NBR 6118:2014)

A NBR6118:2014, em 11.3.3.4.1, define 3 situações de análise para consideração composta das cargas de vento e desaprumo:

- a) Caso 30% do momento gerado pelas cargas horizontais de vento em relação à fundação for maior do que o momento gerado pelas cargas verticais ocasionado pelos deslocamentos horizontais pelo desaprumo, também em relação à fundação, considerar apenas cargas de vento;
- b) Caso o inverso seja verdadeiro, considerar apenas desaprumo;
- c) Caso ambas as condições acima não forem atendidas, considerar uma carga amplificada de vento, definida pela seguinte expressão:

$$q_{vento}^{amplificada} = q_{vento} \left(\frac{M_{cargas\ de\ vento} + M_{desaprumo}}{M_{cargas\ de\ vento}} \right) \quad (5)$$

Finalmente, determinados a classificação da estrutura e os efeitos globais de 2ª ordem que nela ocorrem, deve-se avaliar os efeitos locais aos elementos isolados, que devem ser formados pelas barras comprimidas retiradas da estrutura, porém aplicando-se às suas extremidades os esforços obtidos através da análise global de 2ª ordem (item 15.7.4 – NBR 6118, 2014). A análise de elementos isolados apoia-se no item 15.8 da norma, determinando seus efeitos de 2ª ordem a partir do item 15.8.3.

2.2.3 Deslocamentos horizontais

A fim de garantir adequada durabilidade e conforto ao usuário da edificação, deve-se respeitar os limites impostos pelas verificações a ELS (Estado Limite de Serviço). A tabela 13.3 da norma NBR6118:2014 define os limites aceitáveis para cada efeito incidente a edificação. Em relação aos deslocamentos provocados pelo vento, deve-se avaliar as cargas sob a combinação de Estado-limite de Deformações Excessivas (ELS-DEF, $\psi_1 = 0,30$), limitando os deslocamentos absolutos da edificação $H/1.700$ e os deslocamentos entre pavimentos a $H/850$, sendo H a altura entre o solo e o topo do edifício.

Quadro 2: Deslocamentos horizontais limites para aceitabilidade sensorial

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

(fonte: extrato da tabela 13.3, NBR 6118:2014)

Para as edificações estudadas, os limites de deslocamentos laterais impostos pela norma são os seguintes:

Quadro 3: Deslocamentos horizontais limites para cada altura simulada

Número de pavimentos	Altura total - H (m)	Deslocamentos absolutos horizontais limites (cm)	Deslocamentos entre pavimentos horizontais limites (cm)
5	17,50	1,03	0,412
8	28,00	1,65	0,412
16	56,00	3,29	0,412

(fonte: autor)

3 METODOLOGIA

Inicialmente, este trabalho propôs-se a identificar quais as resistências de concreto são as mais vantajosas economicamente quando a edificação é dimensionada sob seções mínimas. Ao longo de seu desenvolvimento, outras possibilidades de análise se mostraram tangíveis e, por isso, foram adicionadas à análise inicial outras duas. Após a primeira análise, logo se tendo identificado a resistências de concreto ótima (neste trabalho, 40 MPa), explorou-se o impacto do aumento de seções dos elementos estruturais sobre a composição de custos das edificações – e o denominamos de segunda análise. Finalmente, tendo-se identificado que o aumento da resistência de concreto se mostrou mais favorável a pilares, e o aumento de seções a lajes e vigas, combinou-se estes dois fatores na análise dita terceira – onde foram avaliados custos quando utilizados concretos de 50 MPa para pilares e 25 MPa para lajes e vigas.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para realizar o cálculo estrutural das diversas simulações necessárias e quantificar os materiais de cada um dos modelos analisados, utilizou-se o *software* TQS, versão 21.18.5.

Em um primeiro momento, desenvolveu-se o desenho da planta da edificação *software* AutoCAD. Uma vez definida a geometria de cada pavimento, ela foi utilizada como base para a modelagem das edificações simuladas e auxiliar no lançamento estrutural delas, agora no *software* TQS. Os cálculos não estruturais, e.g. orçamentários, foram realizados no aplicativo Excel a partir dos quantitativos gerados pelo TQS.

Foi utilizada a premissa de que o processo construtivo é similar em todos os modelos analisados a fim de torná-los comparáveis, isto é, considera-se que a facilidade de locação de equipamentos e aquisição de materiais, a ordem de montagem e demais processos construtivos são tão semelhantes entre as edificações a ponto de não influenciar o custo relativo entre elas.

3.2 O software TQS

Para a análise isolada dos elementos do subsistema horizontal da estrutura, a modelagem realizada pelo TQS é feita a partir de um modelo de grelhas, tanto para vigas como para lajes; no que tange a análise global da edificação, como verificações de estabilidade por exemplo, bem como para a determinação dos esforços nos pilares e vigas, o *software* utiliza um modelo de pórtico espacial, no qual é empregada aproximação de diafragmas rígidos e para o qual são transferidas as cargas identificadas no modelo de grelha.

O modelo de cálculo utilizado pelo TQS para todas as simulações é descrito abaixo (TQS, 2022):

“O edifício será modelado por um pórtico espacial mais os modelos dos pavimentos (vigas contínuas ou grelhas). O pórtico será composto apenas por barras que simulam as vigas e pilares da estrutura, com o efeito de diafragma rígido das lajes devidamente incorporado. Os efeitos oriundos das ações verticais e horizontais nas vigas e pilares serão calculados com o pórtico espacial. Nas lajes, somente os efeitos gerados pelas ações verticais serão calculados, de acordo com o modelo selecionado para os pavimentos. Nos pavimentos simulados por grelha de lajes, os esforços resultantes das barras de lajes sobre vigas serão transferidos como cargas para o pórtico espacial, ou seja, há uma certa integração entre ambos os modelos (pórtico espacial e grelhas). Para os demais tipos de modelos de pavimento, as cargas das lajes serão transferidas para o pórtico por meio de quinhões de carga. [...]”

Para fins de modelagem, optou-se por considerar o sistema de diafragma rígido atuando em todos os pavimentos edificação. Sendo assim, considera-se que as deformações no plano do pavimento são tão pequenas comparadas com as deformações verticais e de pórticos da estrutura a ponto de serem desprezíveis. Como corolário, quaisquer pontos pertencentes às lajes dos pavimentos não alteram sua distância entre si à medida que a estrutura é solicitada e deformada, e o pavimento como um todo se comporta, em seu plano, como um corpo rígido sob translação e rotação.

Quanto suas características gerais, considerou-se a edificação perfeitamente engastada ao solo; logo, a fundação não fora dimensionada. Para todas as vigas, considerou-se o efeito de mesa colaborante para análise estrutural de cada pórtico da estrutura, isto é, a laje contribui para a inércia total da seção das vigas nela tangentes. Esta consideração foi feita para estabelecer de forma mais realista as distribuições de esforços internos, tensões e deformações da estrutura calculada.

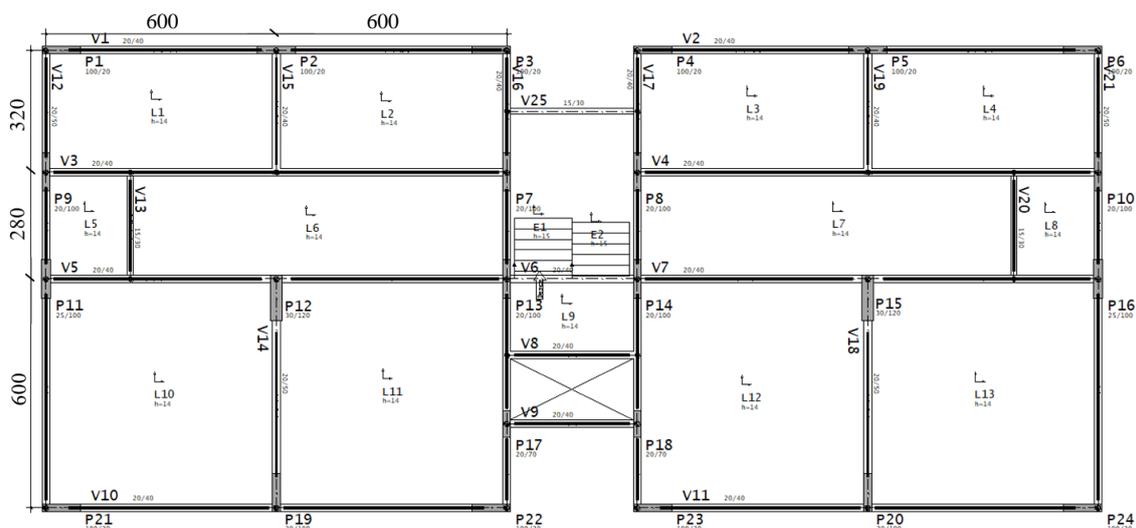
3.3 PLANTA E GEOMETRIA DA ESTRUTURA

A planta utilizada para todos os modelos foi a mesma e fora concebida com o intuito de simular uma edificação comercial padrão. Tomou-se o cuidado de que seu desenho fosse similar a plantas já estudadas em outros trabalhos (e.g. Matias, 2019), a fim de tornar os resultados encontrados neste razoavelmente comparáveis aos demais.

Durante o estudo, a altura das edificações foi variada entre 5 e 16 pavimentos. Todas possuem um pavimento térreo e um pavimento de cobertura, tendo seus pavimentos ditos como tipo. Considerou-se todas as edificações simuladas inseridas a um ambiente urbano, portanto, classe de agressividade ambiental (CAA) II (ABNT, 2014) e f_{ck} de concreto mínimo de 25 MPa (conforme tabela 7.1). A planta dos pavimentos tipo possui 303 m², com pé-direito entre pavimentos de 3,5 m. Tal altura de pé-direito foi definida a fim de fidelizar a comparação entre o modelo gerado neste trabalho e o modelo utilizado por Matias (2019); naquela ocasião, a generosa distância entre pavimentos propiciou a submissão da edificação a cargas de vento relevantes, uma vez que esta estava limitada a 5 pavimentos.

A planta é composta por duas regiões dispostas no entorno de um eixo de simetria Y. Cada uma das regiões possui 12 pilares ao todo – 7 (sete) deles têm sua maior dimensão em Y e 5 (cinco) em X –, 8 vigas e 6 lajes. As duas regiões são interligadas por um corredor central, este que também é utilizado para o vão do elevador e passagem de escada.

Figura 2: Planta do pavimento tipo da edificação



(fonte: autor/TQS)

3.4 CARGAS

Todas as edificações possuem planta única e idêntica para todos os pavimentos. Para todos o pavimento tipo, o peso próprio de cada elemento, o peso próprio de revestimentos e pisos, cargas variáveis e cargas acidentais foram levados em consideração conforme regido pela NBR 6120:2019:

- a) Lajes: $PP + 2 \text{ kN/m}^2$ (permanente) + 3 kN/m^2 (variável) – uso comercial/escritório;
- b) Vigas (sob alvenaria tijolo vazado de 15 cm): $PP + 5,4 \text{ kN/m}$ (permanente) + reações das lajes;
- c) Pilares: $PP +$ cargas superiores (lajes e vigas).

Cargas de vento foram consideradas seguindo o recomendado pela norma NBR6123:1988. A velocidade básica do vento foi estimada a partir do mapa de isopletas disponibilizado no item 5.1 da norma. Foram consideradas excentricidades de -15° e 15° para cada direção de atuação de vento nos 4 lados da edificação, totalizando 12 casos de vento analisados. A velocidade básica do vento tomada fora 45 m/s (Porto Alegre), fator topográfico S1 igual a 1, categoria de rugosidade IV (zona urbanizada) e fator estatístico S3 do vento de valor 1 (edificações em geral). A classe da edificação S2 variou conforme a altura do modelo estrutural utilizado em cada simulação. Conforme indica a NBR

6123:1988 no seu item 4.2, a fórmula geral para cálculo da carga de vento e coeficiente de arrasto é a que segue:

$$C_a = \frac{F_a}{q A_e} \quad (6)$$

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (7)$$

$$V_k = S_1 S_2 S_3 V_0 \quad (8)$$

Onde:

F_a = força de arrasto (N)

C_a = coeficiente de arrasto

A_e : área frontal efetiva (m^2)

V_0 : velocidade básica do vento (m/s)

V_k : velocidade característica do vento (m/s)

q : pressão dinâmica do vento (N/m^2)

A partir da aplicação das equações acima, os coeficientes de arrasto, para as três alturas analisadas, calculados pelo *software* TQS são apresentados abaixo:

Tabela 1: Coeficientes de arrasto para cada altura simulada

Altura	5 Pavimentos - 17,5 m			8 Pavimentos - 28 m			16 Pavimentos - 56 m		
	CA	L1/L2	H/L1	CA	L1/L2	H/L1	CA	L1/L2	H/L1
0	0,78	0,44	1,43	0,81	0,44	2,27	0,88	0,44	4,59
90	1,02	2,27	0,63	1,07	2,27	1,00	1,33	2,27	2,03
180	0,78	0,44	1,43	0,81	0,44	2,27	0,88	0,44	4,59
270	1,02	2,27	0,63	1,07	2,27	1,00	1,33	2,27	2,03

(fonte: TQS, adaptado pelo autor)

Por fim, as combinações avaliadas pelo TQS são as presentes no Anexo A. Vale ressaltar que, por padrão, os coeficientes acidentais adotados pelo TQS em edificações comerciais são os valores mais críticos (bibliotecas, oficinas e arquivos) dentre os recomendados pela NBR 6118:2014 em sua Tabela 11.2. As siglas expostas no Anexo A são descritas abaixo:

ELU – Estado Limite Último – vigas, lajes e pilares

ELS – Estado Limite de Serviço – vigas, lajes e pilares

FOGO – Verificação em situação de incêndio

COMBFLU – Cálculo de fluência

PERM – Carga permanente

ACID – Carga acidental

PP – Peso próprio

VENT – Carga de vento nas 4 direções consideradas (0°, 90°, 180° e 270°)

3.5 REFINAMENTO ESTRUTURAL

Para cada resistência de concreto, tomou-se como objetivo encontrar as menores dimensões que viabilizassem estruturalmente a edificação, de forma a gerar um padrão que permitisse a comparação entre os diversos modelos das soluções encontradas. Para tanto, foram construídos modelos a partir da planta padrão definida e, iterativamente, encontradas tais seções mínimas.

Todos os pilares são retangulares, com uma direção de maior inércia pré-estabelecida. Cada pilar, viga e laje foram inicialmente dimensionados por uma seção mínima estipulada. Para as vigas, estipulou-se como dimensão inicial 20x20, pilares 20x25 e lajes espessura de 10 cm. Para cada modelo, conforme as seções iniciais não fossem suficientes para viabilizar estruturalmente a edificação, realizaram-se acréscimos de dimensão conforme os seguintes critérios:

- a) Pilares: acréscimo de seção nos pilares deu-se pelo aumento da maior dimensão, em passos de 5 cm, até que seu dimensionamento fosse viabilizado. Caso a razão entre a maior e menor dimensão da seção transversal superasse 5 (critério para pilar-parede), aumentou-se a menor dimensão em 5 cm;
- b) Vigas: deu-se pelo aumento da dimensão de altura da viga, ao passo de 5 cm. Caso a razão entre a altura e a largura da seção transversal da viga superasse 4, aumentou-se a direção secundária em 5 cm;
- c) Lajes: deu-se pelo aumento de sua espessura, ao passo de 1 cm.

Desta forma, as possíveis dimensões para os elementos construtivos são as seguintes:

Quadro 4: Possibilidades para seções dos elementos estruturais

nº do acréscimo	Pilares (cm ²)	nº do acréscimo	Vigas (cm ²)	nº do acréscimo	Lajes (cm)
Valor base	20 x 25	Valor base	20 x 20	Valor base	10
1	20 x 30	1	20 x 25	1	11
2	20 x 35	2	20 x 30	2	12
3	20 x ...	3	20 x ...	3	13
15	20 x 100	12	20 x 80	4	14
16	25 x 30	13	25 x 25	5	15
17	25 x 35	14	25 x 30	6	16
18	25 x 40	15	25 x 35	7	17
19	25 x ...	16	25 x ...	8	18
36	25 x 125	28	25 x 100	9	19
37	30 x 35	29	30 x 30	10	20
38	30 x 40	30	30 x 35	11	21
39	30 x 45	31	30 x 40	12	22
40	30 x ...	32	30 x ...	13	23
61	30 x 150	47	30 x 120	14	24
62	35 x 35	48	35 x 35	15	25

(fonte: autor)

A planta possui um eixo de simetria geométrico na direção Y. Devido esta simetria, quando fora necessário aumentar a dimensão de algum elemento qualquer para atender os critérios da norma, o elemento simetricamente correspondente naturalmente também teve sua dimensão acrescida.

A ordem de prioridade de dimensionamento manteve-se a mesma para todas as edificações simuladas. Primeiramente, optou-se por dimensionar os elementos a partir das solicitações locais que neles atuavam. Quanto maior a altura da edificação, a estabilidade global e os deslocamentos horizontais tornam-se cada vez mais relevantes, e o aumento das dimensões da seção transversal dos elementos construtivos se fez necessário para atender as recomendações da norma. Então, a fim de aplicar um método padronizado a todos os modelos, realizaram-se acréscimos nas dimensões principais dos pilares seguindo a ordem indicada no Quadro 4, caso os critérios de estabilidade ou deslocamentos horizontais não fossem cumpridos.

Prioridade de dimensionamento dos elementos construtivos:

1. Para solicitações locais (conforme indicados em 2.2.1);
2. Para estabilidade global (Gama Z – 2.2.2);
3. Para deslocamentos horizontais (2.2.3).

Para permanecer dentro dos limites do método de análise, limitou-se a estrutura a um Gama Z de 1,3 em todas as simulações, permitindo que os efeitos de segunda ordem possam ser aproximados por uma amplificação das cargas horizontais decorrentes do vento e/ou desaprumo. Quanto aos deslocamentos horizontais, cada altura de edificação simulada possui um deslocamento limite (indicados na Tabela 1); caso os deslocamentos máximos fossem ultrapassados, a rigidez dos pórticos na direção crítica foi aumentada através do aumento de seção dos pilares com mesma direção principal.

O programa TQS informa os quantitativos para volume de concreto, aço e área de fôrmas, a partir dos quais é calculado o custo de cada elemento e, por conseguinte, o custo total da edificação para determinada resistência de concreto. Os detalhamentos de armaduras gerados pelo TQS não foram alterados a fim de garantir a comparabilidade entre os modelos estudados.

3.6 CÁLCULO DE CUSTO DA EDIFICAÇÃO

Para o cálculo de custo final de edificação, foram combinados os volumes originados pelo programa TQS com os preços de realização informados pelo SINAPI de acordo com as composições de cada item de custo utilizado para a produção de cada elemento da edificação. Todas as composições utilizadas são exibidas no Anexo B. São listados abaixo os principais itens de custo utilizados para o cálculo do custo total das edificações estudadas:

Quadro 5: Principais itens de custo utilizados

Código	Descrição do item ¹	Valor total	Valor insumos	Valor MO	Unidade
92725	Concretagem de vigas e lajes, fck=20 mpa, para lajes maciças com uso de bomba	522,45	495,46	26,99	(R\$/m ³)
92720	Concretagem de pilares, fck = 25 mpa, com uso de bomba	542,66	511,2	31,46	(R\$/m ³)
92510	Montagem e desmontagem de fôrma de laje maciça, em chapa de madeira compensada resinada, 2 utilizações	77,43	59,6	17,83	(R\$/m ²)
92452	Montagem e desmontagem de fôrma de viga, em chapa de madeira resinada, 2 utilizações	176,71	130,78	45,93	(R\$/m ²)
92415	Montagem e desmontagem de fôrma de pilares, em chapa de madeira compensada resinada, 2 utilizações	148,45	119,24	29,21	(R\$/m ²)
92769	Armação de laje utilizando aço ca-50 de 6,3 mm	13,72	12,07	1,65	(R\$/kg)
92760	Armação de pilar ou viga de uma estrutura utilizando aço ca-50 de 6,3 mm	14,74	12,31	2,43	(R\$/kg)

(fonte: SINAPI – adaptado pelo autor)

Pode-se dividir os itens de custo em três grupos: (1) montagem e desmontagem de fôrmas, (2) armação e (3) concretagem. Para o grupo (1), os principais elementos que compõe seu custo são desmoldantes, locações de escoras, barras de ancoragem, serras de bancada, chapas de madeira e a mão de obra para a carpintaria. Já para a armação de vigas, lajes e pilares, os espaçadores, arames recozidos e as próprias barras de aço CA-50 – em suas diversas bitolas – são considerados no custo total da operação.

Quanto ao grupo (3), o concreto, a locação do caminhão-betoneira e do vibrador de imersão são precificados. Utilizando a composição do SINAPI de código 92725 e 92720 foi possível estabelecer o custo de concretagem para vigas, pilares e lajes. Contudo, o SINAPI define o custo por m³ apenas para concretagens com concretos de $f_{ck} = 20$ MPa para lajes e vigas, e $f_{ck} = 25$ MPa para pilares; portanto, estimou-se o custo para concretagens com resistências mais altas a partir da substituição do valor do insumo “[...] concreto usinado bombeável, C25 [...]” pelo valor de mercado do respectivo m³ de concreto – colhido em uma distribuidora de Porto Alegre –, mantendo-se os custos referentes aos outros procedimentos. A seguinte tabela resume os custos de concretagem estimados para todas as resistências utilizadas nas simulações:

Quadro 6: Estimação de custo para concretagem

Fck (MPa)	Preço de mercado do concreto (R\$/m³)	Pilares - Insumos + MO (R\$/m³)	Lajes e vigas - Insumos + MO (R\$/m³)
25	316,67	542,66	522,45
30	335,33	572,78	551,64
35	353,67	602,38	580,33
40	370,00	628,73	605,87
45	386,00	654,56	630,90
50	417,33	705,12	679,91

(fonte: autor)

Após a identificação de todos os itens de custo das composições necessárias para a construção das edificações, estes foram segregados entre insumos e mão-de-obra, a fim de obter maior detalhamento nos resultados obtidos.

3.7 APLICAÇÃO

Pode-se dividir as análises realizadas neste trabalho em três etapas: dimensionamento sob seções mínimas (4.2), aumento de dimensões para elementos isolados e combinados (4.3) e diferentes resistências para elementos específicos (4.4).

Primeiramente, fora desenvolvido um modelo inicial com o maior f_{ck} (50 MPa) e dimensões pré-dimensionadas para vigas, pilares e lajes para cada uma das alturas. A partir deste modelo inicial, e verificando se todos os critérios estabelecidos pela norma foram atendidos, os demais modelos foram criados decrescendo a resistência do concreto (para 35 MPa e 25 MPa, respectivamente). Isto foi realizado pois, ao diminuir a resistência do concreto, o programa TQS identificou quais os elementos estruturais deveriam ser redimensionados para atender a norma, facilitando o processo de otimização da edificação.

Separadamente, a verificação de deslocamentos verticais (flechas) foi realizada pela simulação de uma edificação de pavimento único, sem carga de vento. Desta forma, foram determinadas as espessuras e seções mínimas para lajes e vigas. Também, assim fora garantida a simetria da edificação.

Foram analisados, então, 3 níveis de resistência à compressão de concretos diferentes: C25 (resistência mínima para CAA da edificação segundo a combinação das tabelas 6.1 e 7.1 da norma NBR6118:2014), C50 (maior resistência de concreto pertencente ao grupo I – segundo NBR8953) e um valor intermediário, escolhido como 35 MPa, em função dos resultados obtidos por Matias (2019). Com os quantitativos de volumes e os respectivos valores de custo para cada elemento da edificação, calculou-se o custo total de cada edificação. Um polinômio de segundo grau foi utilizado para interpolar os 3 pontos e estimar a resistência mais econômica (Figura 4). O processo foi realizado para as 3 alturas de estrutura analisadas: 5 pavimentos (17,5 m), 8 pavimentos (28,0 m) e 16 pavimentos (56,0 m).

Sabendo que a redução das seções dos elementos construtivos implicaria em uma maior utilização de aço – que é o material mais representativo no custo de uma edificação –, foram realizadas novas simulações: aumentou-se as seções de pilares, vigas e lajes,

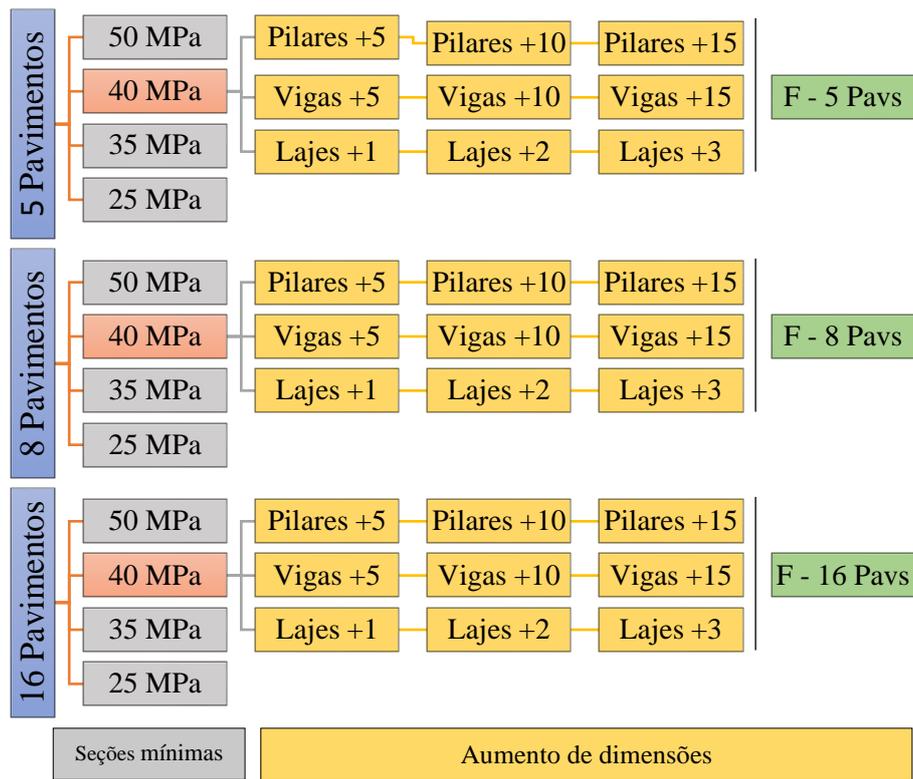
afastando-se gradativamente dos pontos de mínimo previamente encontrados. Este aumento ocorreu sob a seguinte forma:

1. Aumentou-se a dimensão principal dos pilares em 5, 10 e 15 cm;
2. Aumentou-se a dimensão de altura das vigas em 5, 10 e 15 cm;
3. Aumentou-se a dimensão de espessura das lajes em 1, 2 e 3 cm.

A fim de evitar um arranjo experimental fatorial completo (3 alturas de edificações x 4 resistências de concreto x 4 dimensões de pilares x 4 dimensões de vigas x 4 dimensões de lajes, resultando em 768 combinações ou simulações, cada simulação correspondendo ao dimensionamento completo da estrutura, incluindo otimização da mesma para as situações de dimensões mínimas), foi determinada a resistência à compressão que correspondia ao custo mínimo para todas as alturas de estrutura, considerando as seções transversais mínimas (12 dimensionamentos otimizados da estrutura). Para essa resistência ótima, foram considerados aumentos sucessivos nas seções transversais para cada um dos elementos estruturais (lajes, vigas e pilares), mantendo os demais nas suas dimensões mínimas, de forma a evidenciar o efeito isolado de cada componente sobre o custo (27 simulações ou dimensionamentos da estrutura de cada modelo). Finalmente, foi feito o dimensionamento de cada modelo com a combinação das seções transversais de menor custo para cada componente estrutural (3 simulações ou dimensionamentos), reduzindo o número total de simulações para 42 para as duas primeiras análises. Somam-se a estas os três últimos modelos, onde se analisou diferentes resistências de concreto entre elementos.

As simulações realizadas para a primeira e segunda análise estão descritas pelo esquema abaixo.

Figura 3: Esquema de simulações estudadas



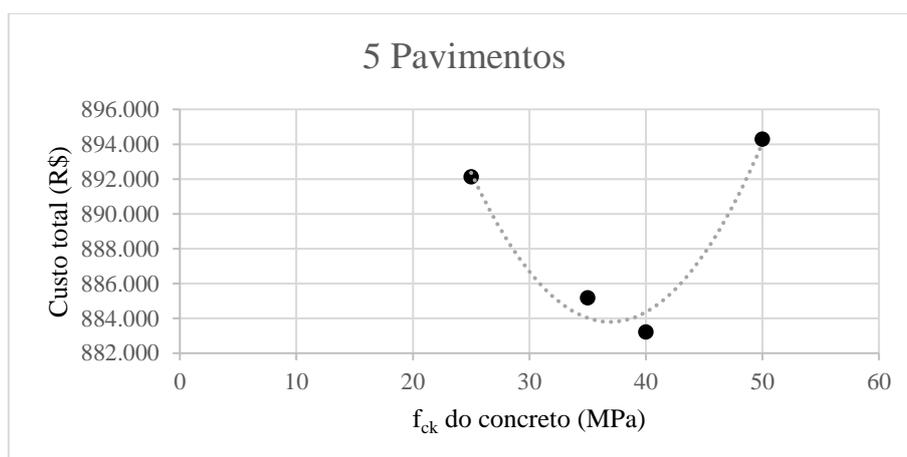
(fonte: autor)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 A resistência de concreto mais econômica

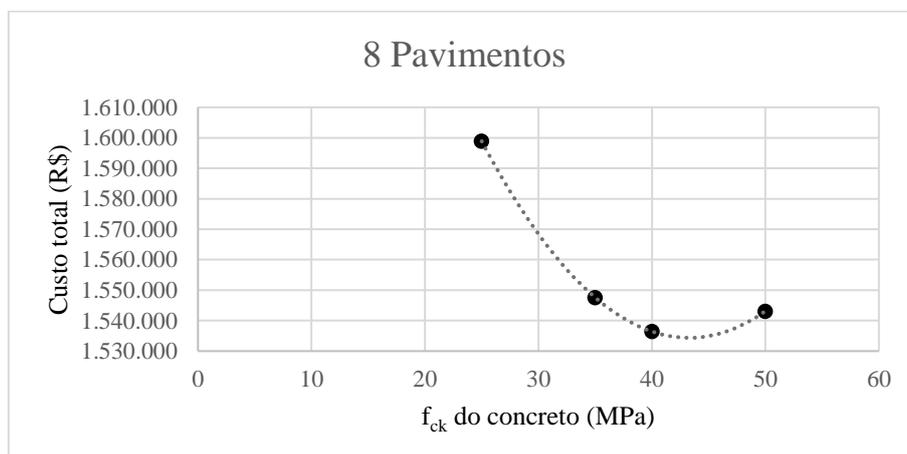
As curvas de interpolação de custo (conforme delineado em 3.7) para edificações de 5, 8 e 16 pavimentos são apresentadas abaixo:

Figura 4: Curvas de interpolação de custo – 5 pavimentos



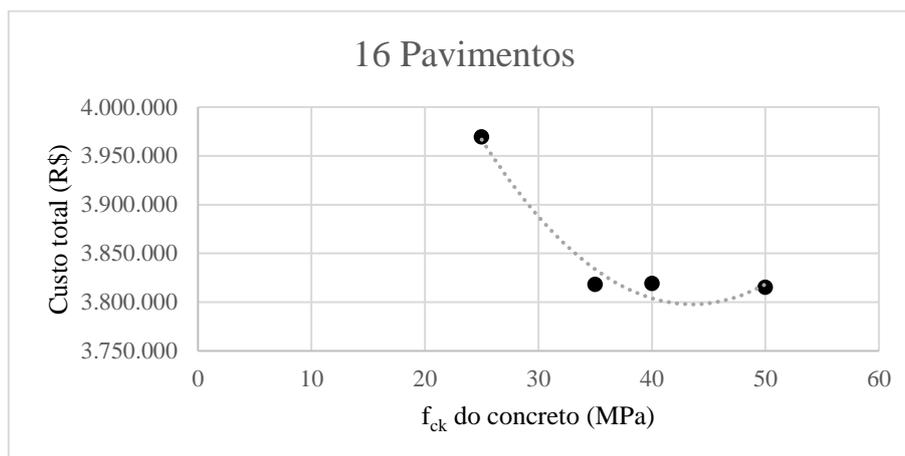
(fonte: autor)

Figura 5: Curvas de interpolação de custo – 8 pavimentos



(fonte: autor)

Figura 6: Curvas de interpolação de custo – 16 pavimentos



(fonte: autor)

4.2 Primeira análise: Dimensionamento sob seções mínimas

Edificações com alturas de 5, 8 e 16 pavimentos foram dimensionadas para resistências de concreto de 25, 35 e 50 MPa, buscando-se no dimensionamento as menores seções transversais que atendessem as prescrições normativas, representando então soluções com o menor volume de concreto possível. A partir dos resultados dessas três resistências, foi possível identificar que a resistência de 40 MPa resultaria no custo mínimo para todas as configurações de altura / número de pavimentos, conforme relatado no item 3.6. O cruzamento entre os quantitativos de material para cada edificação e o custo dos insumos e da mão-de-obra estimados para cada respectivo serviço a partir do SINAPI resultou em custos estruturais totais para cada simulação. Os elementos estruturais que compõe este custo total são lajes, vigas e pilares. Os materiais que formam tais elementos são concreto, aço e fôrmas.

4.2.1 Quantitativos e estimativas de custo

Para a primeira análise realizada, e todas as simulações que a compõe, abaixo são exibidos os quantitativos de consumo segregados por altura de edificação, elemento estrutural, material utilizado e, por fim, resistência à compressão do concreto. Volumes de concreto são lidos em m^3 , fôrmas em m^2 e aço em kg.

Tabela 2: Quantitativos – primeira análise

Altura	5 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)
C25	194	1.373	19.709	64	660	10.471	38	546	5.246	296	2.579	35.426
C35	173	1.373	20.566	65	684	9.460	33	497	5.186	270	2.554	35.212
C40	162	1.373	21.724	65	696	9.025	30	466	4.618	256	2.534	35.367
C50	151	1.373	22.269	65	706	8.997	29	459	3.955	245	2.537	35.221
Altura	8 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)
C25	316	2.184	32.094	101	1.030	22.965	93	1.165	11.595	509	4.379	66.653
C35	259	2.184	35.362	103	1.097	19.219	78	1.019	9.877	440	4.300	64.458
C40	259	2.184	33.960	103	1.105	19.311	73	1.002	9.162	436	4.292	62.432
C50	240	2.184	36.448	104	1.128	18.804	65	918	7.539	409	4.231	62.792
Altura	16 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)
C25	596	4.320	61.625	217	2.086	64.283	430	3.965	41.107	1.243	10.370	167.015
C35	516	4.323	65.115	221	2.188	61.635	366	3.629	30.648	1.103	10.140	157.398
C40	476	4.324	71.658	225	2.244	60.433	329	3.450	29.179	1.030	10.018	161.270
C50	478	4.344	70.033	202	2.181	65.339	286	3.237	25.863	966	9.762	161.235

(fonte: TQS, adaptado pelo autor)

Tabela 3: Quantitativos por pavimento – primeira análise

Altura	5 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)
C25	39	275	3.942	13	132	2.094	8	109	1.049	59	516	7.085
C35	35	275	4.113	13	137	1.892	7	99	1.037	54	511	7.042
C40	32	275	4.345	13	139	1.805	6	93	924	51	507	7.073
C50	30	275	4.454	13	141	1.799	6	92	791	49	507	7.044
Altura	8 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)
C25	39	273	4.012	13	129	2.871	12	146	1.449	64	547	8.332
C35	32	273	4.420	13	137	2.402	10	127	1.235	55	538	8.057
C40	32	273	4.245	13	138	2.414	9	125	1.145	54	537	7.804
C50	30	273	4.556	13	141	2.351	8	115	942	51	529	7.849
Altura	16 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)
C25	37	270	3.852	14	130	4.018	27	248	2.569	78	648	10.438
C35	32	270	4.070	14	137	3.852	23	227	1.916	69	634	9.837
C40	30	270	4.479	14	140	3.777	21	216	1.824	64	626	10.079
C50	30	272	4.377	13	136	4.084	18	202	1.616	60	610	10.077

(fonte: TQS, adaptado pelo autor)

Utilizando-se das composições exibidas no Anexo B e dos quantitativos de volumes extraídos do TQS supracitados, é calculado os custos para cada elemento estrutural da edificação. Todos os valores apresentados abaixo estão em reais (R\$).

Tabela 4: Custos (R\$) totais por serviço – primeira análise

Altura	5 Pavimentos									
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Total
C25	101.512	106.304	240.740	33.437	116.593	127.895	20.513	81.054	64.084	892.130
C35	100.223	106.304	249.209	37.431	120.940	114.626	19.818	73.780	62.841	885.172
C40	98.030	106.304	263.483	39.139	122.937	109.462	18.736	69.103	56.013	883.208
C50	102.666	106.304	270.613	44.058	124.740	109.330	20.448	68.064	48.063	894.287
Altura	8 Pavimentos									
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Total
C25	165.042	169.068	388.522	52.663	182.064	278.006	50.250	172.915	140.363	1.598.894
C35	150.363	169.076	425.993	59.484	193.886	231.525	46.925	151.300	118.979	1.547.531
C40	157.042	169.138	412.010	62.587	195.318	234.288	46.149	148.806	111.153	1.536.491
C50	163.382	169.138	440.313	70.643	199.276	227.165	45.762	136.336	91.074	1.543.090
Altura	16 Pavimentos									
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Total
C25	311.432	334.498	745.443	113.319	368.546	777.597	233.072	588.575	497.251	3.969.734
C35	299.391	334.738	790.204	128.136	386.677	747.970	220.650	538.695	371.932	3.818.393
C40	288.153	334.815	863.899	136.503	396.608	728.567	206.853	512.093	351.779	3.819.271
C50	324.929	336.387	846.593	137.614	385.334	789.848	201.453	480.503	312.644	3.815.304

(fonte: autor)

Tabela 5: Custos (R\$) por serviço por pavimento – primeira análise

Altura	5 Pavimentos									
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Total
C25	20.302	21.261	48.148	6.687	23.319	25.579	4.103	16.211	12.817	178.426
C35	20.045	21.261	49.842	7.486	24.188	22.925	3.964	14.756	12.568	177.034
C40	19.606	21.261	52.697	7.828	24.587	21.892	3.747	13.821	11.203	176.642
C50	20.533	21.261	54.123	8.812	24.948	21.866	4.090	13.613	9.613	178.857
Altura	8 Pavimentos									
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Total
C25	20.630	21.134	48.565	6.583	22.758	34.751	6.281	21.614	17.545	199.862
C35	18.795	21.135	53.249	7.435	24.236	28.941	5.866	18.913	14.872	193.441
C40	19.630	21.142	51.501	7.823	24.415	29.286	5.769	18.601	13.894	192.061
C50	20.423	21.142	55.039	8.830	24.909	28.396	5.720	17.042	11.384	192.886
Altura	16 Pavimentos									
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Total
C25	19.465	20.906	46.590	7.082	23.034	48.600	14.567	36.786	31.078	248.108
C35	18.712	20.921	49.388	8.009	24.167	46.748	13.791	33.668	23.246	238.650
C40	18.010	20.926	53.994	8.531	24.788	45.535	12.928	32.006	21.986	238.704
C50	20.308	21.024	52.912	8.601	24.083	49.366	12.591	30.031	19.540	238.457

(fonte: autor)

Com os custos sendo estimados a partir dos serviços apresentados no SINAPI, é possível calcular a representatividade de insumos e mão-de-obra para cada elemento construído. Também, a segregação entre serviços e elementos quanto sua representatividade de custo sobre o total da edificação é avaliada. Abaixo, resume-se os custos finais de cada um dos 12 modelos simulados em primeira análise:

Tabela 6: Representatividade de custos – primeira análise

Altura	5 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço
C25	11%	12%	27%	4%	13%	14%	2%	9%	7%	17%	34%	49%
C35	11%	12%	28%	4%	14%	13%	2%	8%	7%	18%	34%	48%
C40	11%	12%	30%	4%	14%	12%	2%	8%	6%	18%	34%	49%
C50	11%	12%	30%	5%	14%	12%	2%	8%	5%	19%	33%	48%
Altura	8 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço
C25	10%	11%	24%	3%	11%	17%	3%	11%	9%	17%	33%	50%
C35	10%	11%	28%	4%	13%	15%	3%	10%	8%	17%	33%	50%
C40	10%	11%	27%	4%	13%	15%	3%	10%	7%	17%	33%	49%
C50	11%	11%	29%	5%	13%	15%	3%	9%	6%	18%	33%	49%
Altura	16 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço
C25	8%	8%	19%	3%	9%	20%	6%	15%	13%	17%	33%	51%
C35	8%	9%	21%	3%	10%	20%	6%	14%	10%	17%	33%	50%
C40	8%	9%	23%	4%	10%	19%	5%	13%	9%	17%	33%	51%
C50	9%	9%	22%	4%	10%	21%	5%	13%	8%	17%	32%	51%

(fonte: autor)

Tabela 7: Resumo de custos (R\$) totais e MO – primeira análise

Custo Total (R\$)	Altura		
	5 Pavs	8 Pavs	16 Pavs
Resistência			
25 MPa	892.130	1.598.894	3.969.734
35 MPa	885.172	1.547.531	3.818.393
40 MPa	883.208	1.536.491	3.819.271
50 MPa	894.287	1.543.090	3.815.304
$\frac{C25}{(C_{mais\ econômico})}$	-1,0%	-3,9%	-3,9%
MO (R\$)	Altura		
	5 Pavs	8 Pavs	16 Pavs
Resistência			
25 MPa	118.408	201.964	483.408
35 MPa	115.880	196.967	468.227
40 MPa	116.190	196.505	461.438
50 MPa	116.308	195.108	449.576
$\frac{C25}{(C_{mais\ econômico})}$	-2,1%	-3,4%	-7,0%

(fonte: autor)

Tabela 8: Resumo de custos (R\$) totais por pavimento – primeira análise

Custo por Pav (R\$)	Altura		
	Resistência	5 Pavs	8 Pavs
25 MPa	178.426	199.862	248.108
35 MPa	177.034	193.441	238.650
40 MPa	176.642	192.061	238.704
50 MPa	178.857	192.886	238.457

(fonte: autor)

Tabela 9: Resumo de custos (R\$) por pavimento – pilares vs. ligas + lajes

Altura	Custos totais 5 pavimentos					Custos relativos			
	Material	Lajes	Vigas	Lajes + Vigas	Pilares	Total	Lajes	Vigas	Lajes + Vigas
C25	89.711	55.585	145.296	33.130	178.426	50%	31%	81%	19%
C35	91.147	54.599	145.747	31.288	177.034	51%	31%	82%	18%
C40	93.563	54.308	147.871	28.771	176.642	53%	31%	84%	16%
C50	95.917	55.626	151.542	27.315	178.857	54%	31%	85%	15%
Altura	Custos totais 8 pavimentos					Custos relativos			
	Material	Lajes	Vigas	Lajes + Vigas	Pilares	Total	Lajes	Vigas	Lajes + Vigas
C25	90.329	64.092	154.421	45.441	199.862	45%	32%	77%	23%
C35	93.179	60.612	153.791	39.651	193.441	48%	31%	80%	20%
C40	92.274	61.524	153.798	38.264	192.061	48%	32%	80%	20%
C50	96.604	62.135	158.740	34.147	192.886	50%	32%	82%	18%
Altura	Custos totais 16 pavimentos					Custos relativos			
	Material	Lajes	Vigas	Lajes + Vigas	Pilares	Total	Lajes	Vigas	Lajes + Vigas
C25	86.961	78.716	165.677	82.431	248.108	35%	32%	67%	33%
C35	89.021	78.924	167.945	70.705	238.650	37%	33%	70%	30%
C40	92.929	78.855	171.784	66.920	238.704	39%	33%	72%	28%
C50	94.244	82.050	176.294	62.162	238.457	40%	34%	74%	26%

(fonte: autor)

4.2.2 Análise

De maneira geral, observa-se a possibilidade de redução de dimensões para todos os elementos à medida que a resistência à compressão do concreto é aumentada, embora para vigas essa redução seja bem pouco sensível. Esta redução leva a uma economia de consumo de concreto, que é traduzida em economia de custo do material; ao mesmo tempo, esta redução de seções resulta em maior necessidade de armaduras, principalmente para elementos dimensionados à flexão.

Considerando cada resistência de concreto utilizada, percebe-se que, independentemente da altura da estrutura, o volume de concreto médio por pavimento para lajes e vigas é praticamente constante, evidenciando uma forte dependência desses elementos às solicitações geradas pelas cargas verticais, que não se alteram com o aumento do número de pavimentos, em especial para as lajes. Por outro lado, os pilares

apresentam forte sensibilidade com a altura da edificação, pois são os elementos estruturais mais solicitados pelas cargas de vento: a pressão do vento aumenta com a altura, a carga acumulada acima de um dado pavimento aumenta com o número de pavimentos acima do pavimento de análise, e o braço de alavanca dessa carga acumulada igualmente aumenta. Isso faz com que o volume de concreto por pavimento para pilares aproximadamente triplique com a mudança de 5 para 16 pavimentos, e mais que duplique de 8 para 16 pavimentos.

Como tendência geral, nas lajes, à medida que a resistência do concreto aumenta, o volume de concreto consumido por este elemento por pavimento diminui (diminuição da espessura das lajes), o consumo de aço aumenta, decorrendo da diminuição da altura útil das lajes (braço de alavanca das armaduras). Exceções são para 8 pavimentos o concreto C35, que resulta em um consumo maior de aço que o concreto C40, e para 16 pavimentos o concreto C40, que resulta num consumo maior de aço que o concreto C50. Um aspecto importante a elencar é que a taxa de armadura mínima (área de aço mínima em relação à área bruta de concreto da seção), pelo critério dado no item 17.3.5.2 da NBR 6118:2014 cresce com o aumento da resistência à compressão, fazendo com que o consumo de aço aumente com o aumento da resistência do concreto quando esse aumento é maior que a diminuição decorrente da redução da seção (redução da espessura da laje).

Para as lajes, o consumo de fôrmas é praticamente constante, independente da resistência à compressão do concreto e do número de pavimentos. Considerando que a mudança de solicitações e de resistência afetam apenas a espessura das lajes, as pequenas variações existentes devem-se à mudança das dimensões dos pilares, que, ao assumirem maiores dimensões de seção transversal, provocam a redução na área das fôrmas das lajes.

Para as vigas, o consumo de concreto e fôrmas permaneceu praticamente constante com o aumento da resistência do concreto e com o aumento do número de pavimentos da estrutura. Neste elemento estrutural, a tendência de comportamento geral a diminuição do consumo de aço por pavimento com o aumento da resistência. Exceção a essa tendência é, para 8 pavimentos, o concreto C40, que resultou num consumo de aço maior que o C35, e para 16 pavimentos o concreto C50 que resultou num consumo maior de aço que o C40.

Comparando o consumo de aço em cada resistência do concreto com o aumento do número de pavimentos, percebe-se que, quanto maior a altura da estrutura, maior o consumo médio de aço por pavimento para as vigas. Isso evidencia que as cargas de vento geram solicitações que afeta tanto vigas quanto pilares, pois esses 2 elementos estruturais, formando pórticos, são os grandes responsáveis pela estabilização horizontal da edificação. Enquanto de uma maneira geral as dimensões das seções transversais nas estruturas com 5 e 8 pavimentos foram determinadas pelas solicitações, nas estruturas com 16 pavimentos o deslocamento horizontal máximo admissível foi o fator determinante para as dimensões dos elementos que compõe as subestruturas verticais de contraventamento (Tabela 11). Como as vigas permaneceram com dimensões de seções transversais praticamente constantes com o aumento da altura, o aumento das solicitações foi absorvido pelo aumento do consumo de aço, que é bem significativo: as estruturas com 8 pavimentos consomem aproximadamente 35% mais aço por pavimento em vigas que as estruturas com 5 pavimentos, e as de 16 pavimentos consomem aproximadamente o dobro de aço por pavimento que as de 5 pavimentos.

A partir de certa resistência, o aumento da qualidade do concreto não se traduz em reduções de custos para a estrutura. O ponto de inversão da curva de custos se dá quando a economia – por conta da diminuição do volume de concreto, da área de fôrmas e da quantidade de aço nos pilares – não supera os gastos adicionais por se utilizar um concreto de maior resistência somados ao maior volume necessário de armaduras em vigas e lajes. Desta forma, existe um fator limitante para os ganhos gerados pelo investimento em qualidade de concreto. Considerando os custos totais, incluindo a totalidade dos elementos estruturais (lajes, vigas e pilares), o concreto C40 aparece como o mais vantajoso para as estruturas de 5 e 8 pavimentos, e igualmente vantajoso aos concretos C35 e C50 na estrutura de 16 pavimentos.

À medida que a edificação é elevada em altura, a representatividade dos pilares no custo total da edificação aumenta (Tabela 6 e Tabela 9). Uma edificação mais solicitada – ocasionado por mais pavimentos em superestrutura e maiores cargas de vento – exigem grandes seções em sua base. Por ter se utilizado seções constantes ao longo de todos os pavimentos da edificação, as dimensões exigidas na base se propagam para seu topo, implicando em volumes de concreto inicialmente desnecessários em pavimentos mais altos. Um exemplo desta característica está presente no modelo de 25 MPa para 16

pavimentos, cujos pilares a partir do pavimento 8 são dimensionados pela taxa armadura mínima (Tabela 10).

Tabela 10: Variação da taxa de armadura (ρ) entre pavimentos

Lance	Pavimento	Seção		Armadura longitudinal				
		Formato	A (cm ²)	n	Ø (mm)	A _s (cm ²)	ρ	ρ_{Tras}
16	Cobertura	30.x 150.	4500	16	12,5	19,6	0,44	0,87
15	Tipo_1	30.x 150.	4500	16	12,5	19,6	0,44	0,87
14	Tipo_1	30.x 150.	4500	16	12,5	19,6	0,44	0,87
13	Tipo_1	30.x 150.	4500	16	12,5	19,6	0,44	0,87
12	Tipo_1	30.x 150.	4500	16	12,5	19,6	0,44	0,87
11	Tipo_1	30.x 150.	4500	16	12,5	19,6	0,44	0,87
10	Tipo_1	30.x 150.	4500	16	12,5	19,6	0,44	0,87
9	Tipo_1	30.x 150.	4500	16	12,5	19,6	0,44	0,87
8	Tipo_1	30.x 150.	4500	16	12,5	19,6	0,44	1,15
7	Tipo_1	30.x 150.	4500	16	16,0	32,2	0,71	1,79
6	Tipo_1	30.x 150.	4500	24	16,0	48,3	1,07	3,69
5	Tipo_1	30.x 150.	4500	24	25,0	117,8	2,62	5,24
4	Tipo_1	30.x 150.	4500	24	25,0	117,8	2,62	5,24
3	Tipo_1	30.x 150.	4500	24	25,0	117,8	2,62	5,67
2	Tipo_1	30.x 150.	4500	28	25,0	137,4	3,05	6,98
1	Tipo_1	30.x 150.	4500	36	25,0	176,7	3,93	7,85

(fonte: TQS)

Nos casos em que as solicitações impostas aos pilares da edificação foram contidas por algum arranjo de armadura e passaram nos critérios de verificação da norma, mas a estrutura apresentou deslocamentos horizontais ou coeficiente Gama Z acima do permitido por ela, diz-se que tal estrutura fora dimensionada por fatores não locais. Estes fatores não locais, elencados na seção 3.5, podem ser tanto referentes à estabilidade global da estrutura como a limitações de deslocamentos (horizontais) para situação em serviço.

Observa-se que, quanto maior a altura, maior a influência das cargas vento e relevância dos efeitos de segundo ordem e estabilidade global no que tange o dimensionamento dos elementos estruturais. Através do coeficiente Gama Z e do deslocamento horizontal máximo de cada edificação, foi possível identificar os fatores que determinaram o dimensionamento de seus elementos. Abaixo é demonstrado os coeficientes e fatores dimensionantes para cada simulação:

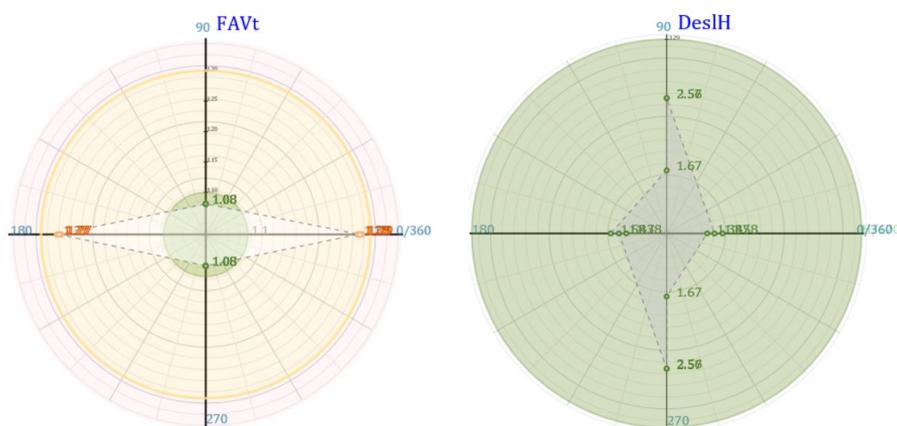
Tabela 11: Coeficiente Gama Z e deslocamentos horizontais máximos

Altura	5 Pavimentos		8 Pavimentos		16 Pavimentos	
	Gama Z/FAVt	Deslocamentos horizontais máximos (cm)	Gama Z/FAVt	Deslocamentos horizontais máximos (cm)	Gama Z/FAVt	Deslocamentos horizontais máximos (cm)
C25	1,26	0,93	1,29	1,54	1,29	2,57
C35	1,25	0,95	1,28	1,62	1,27	2,48
C40	1,27	0,99	1,27	1,61	1,26	2,65
C50	1,22	0,89	1,28	1,55	1,30	3,09
Valores limites	1,30	1,03	1,30	1,65	1,30	3,29

(fonte: autor)

Por conta de uma maior área de superfície sob influência das cargas de vento, os deslocamentos mais acentuados se deram na direção Y. Para o arranjo de pilares, vigas e lajes estudado, a direção X apresentou menores deslocamentos, porém menor contribuição para estabilidade global. Pode-se verificar isto uma vez que os deslocamentos horizontais se dão com maior facilidade na direção Y e o coeficiente Gama Z é predominante na direção X (Figura 7).

Figura 7: Efeitos de segunda ordem – C25, 16 pavimentos

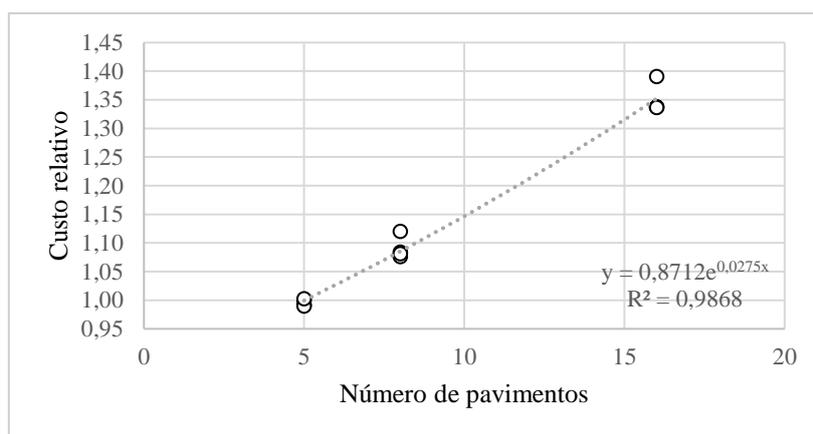


(fonte: TQS)

Nos casos em que o Gama Z ou os deslocamentos horizontais sejam os efeitos dimensionantes para a edificação (casos em que a altura é elevada), a redução de dimensões é limitada; portanto, a redução de custos guiadas pelo aumento da resistência do concreto, embora que este contribua para a rigidez da edificação e possibilite pequenas seções para verificações locais, esbarra na garantia de estabilidade global da estrutura.

A análise dos custos totais da estrutura permite vislumbrar que os custos crescem exponencialmente com a altura da edificação. Considerando como unitário o custo médio por pavimento das estruturas de 5 pavimentos para cada resistência do concreto, foi possível transformar os custos médios por pavimento das estruturas com 8 e 16 pavimentos de cada resistência em custos relativos, permitindo obter a curva mostrada na Figura 8.

Figura 8: Custo relativo vs. Número de pavimentos



(fonte: autor)

Contudo, uma única resistência à compressão do concreto não é capaz de simultaneamente minimizar os custos de lajes, vigas e pilares. Considerando que em inúmeras obras, lajes e vigas podem ser moldadas com concretos de resistência diferente dos pilares, a análise dos dados da Tabela 9 indica que, para lajes, é mais interessante utilizar concretos de mais baixa resistência (C25) e, para pilares, os concretos com a mais alta resistência possível (C50). Os custos das vigas são menos sensíveis à mudança na resistência do concreto que as lajes, com concretos entre C25 e C35 resultando em custos muito próximos.

4.3 Segunda análise: Aumento de dimensões

4.3.1 Quantitativos e estimativas de custo

Os quantitativos segregados por elemento estrutural, serviço e altura são apresentados abaixo. A nomenclatura definida para da simulação, a fim de facilitar a compreensão dos valores presentes na tabela, é como segue:

L1: aumento da espessura de lajes em 1 cm;

L2: aumento da espessura de lajes em 2 cm;

L3: aumento da espessura de lajes em 3 cm;

V1: aumento da altura de vigas em 5 cm;

V2: aumento da altura de vigas em 10 cm;

V3: aumento da altura de vigas em 15 cm;

P1: aumento da dimensão maior de pilares em 5 cm;

P2: aumento da dimensão maior de pilares em 10 cm;

P3: aumento da dimensão maior de pilares em 15 cm;

F: aumento combinado de todos os elementos estruturais, que independente geraram as maiores economias.

Para as combinações finais (F), a simulação de cada uma das três alturas foi composta por dimensões acrescidas diferentes:

F – 5 pavimentos: L1 + V2 + P2;

F – 8 pavimentos: L2 + V3 + P1;

F – 16 pavimentos: L2 + V2 + P1.

Tabela 12: Quantitativos – segunda análise

Altura	4 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)
C40	162	1.373	21.724	65	696	9.025	30	466	4.618	256	2.534	35.367
L1	173	1.373	20.469	65	686	9.005	30	466	4.517	267	2.525	33.991
L2	184	1.373	19.917	65	677	9.252	30	466	4.530	278	2.515	33.699
L3	194	1.373	19.182	65	667	9.277	30	466	4.417	289	2.506	32.876
V1	162	1.373	19.633	71	759	8.837	30	466	4.453	263	2.597	32.922
V2	162	1.373	18.359	77	825	8.113	30	466	4.302	269	2.663	30.775
V3	162	1.372	17.527	84	890	7.953	30	466	4.190	276	2.727	29.670
P1	162	1.373	21.669	64	691	8.702	34	506	4.049	260	2.570	34.420
P2	162	1.373	21.031	64	687	8.443	38	543	3.824	263	2.603	33.297
P3	162	1.373	20.988	64	683	8.189	42	585	3.645	267	2.640	32.822
F	173	1.373	17.448	83	868	7.582	38	546	3.798	293	2.787	28.827
Altura	8 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)
C40	259	2.184	33.960	103	1.105	19.311	73	1.002	9.162	436	4.292	62.432
L1	278	2.184	32.928	103	1.089	19.108	73	1.002	9.273	455	4.276	61.308
L2	297	2.184	31.455	103	1.069	18.809	80	1.036	8.313	480	4.289	58.577
L3	316	2.184	30.754	103	1.053	18.664	80	1.036	8.496	499	4.273	57.913
V1	259	2.184	31.625	114	1.213	17.843	73	1.002	9.067	447	4.400	58.534
V2	259	2.184	31.820	121	1.289	16.569	73	1.002	9.429	454	4.476	57.818
V3	259	2.183	28.237	136	1.431	15.843	73	1.002	8.865	469	4.616	52.945
P1	259	2.184	34.089	103	1.098	19.026	83	1.075	8.091	445	4.357	61.206
P2	259	2.184	33.996	102	1.092	18.550	89	1.137	7.576	451	4.412	60.122
P3	259	2.184	33.930	101	1.085	18.035	96	1.204	7.653	457	4.473	59.618
F	297	2.184	27.942	135	1.390	15.287	84	1.081	7.975	516	4.654	51.204
Altura	16 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)
C40	476	4.324	71.658	225	2.244	60.433	329	3.450	29.179	1.030	10.018	161.270
L1	516	4.324	66.868	225	2.212	59.872	329	3.450	29.389	1.070	9.986	156.129
L2	556	4.324	63.309	225	2.180	60.444	329	3.450	29.093	1.111	9.954	152.846
L3	597	4.324	61.143	225	2.148	60.252	329	3.450	29.897	1.151	9.922	151.292
V1	476	4.324	65.371	248	2.455	53.033	329	3.450	27.984	1.052	10.229	146.389
V2	476	4.324	60.865	270	2.661	50.378	329	3.450	27.580	1.074	10.434	138.822
V3	476	4.324	58.616	289	2.840	48.589	329	3.450	27.891	1.094	10.613	135.096
P1	476	4.324	69.339	223	2.225	56.949	344	3.584	31.223	1.043	10.133	157.511
P2	476	4.323	69.739	222	2.206	53.756	360	3.718	31.525	1.057	10.248	155.019
P3	476	4.323	70.012	220	2.187	52.819	375	3.853	30.748	1.070	10.363	153.579
F	556	4.324	57.498	267	2.569	48.721	344	3.584	30.668	1.168	10.476	136.887

(fonte: TQS, adaptado pelo autor)

Tabela 13: Quantitativos por pavimento – segunda análise

Altura	5 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)
C40	32	275	4.345	13	139	1.805	6	93	924	51	507	7.073
L1	35	275	4.094	13	137	1.801	6	93	903	53	505	6.798
L2	37	275	3.983	13	135	1.850	6	93	906	56	503	6.740
L3	39	275	3.836	13	133	1.855	6	93	883	58	501	6.575
V1	32	275	3.927	14	152	1.767	6	93	891	53	519	6.584
V2	32	275	3.672	15	165	1.623	6	93	860	54	533	6.155
V3	32	274	3.505	17	178	1.591	6	93	838	55	545	5.934
P1	32	275	4.334	13	138	1.740	7	101	810	52	514	6.884
P2	32	275	4.206	13	137	1.689	8	109	765	53	521	6.659
P3	32	275	4.198	13	137	1.638	8	117	729	53	528	6.564
F	35	275	3.490	17	174	1.516	8	109	760	59	557	5.765
Altura	8 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)
C40	32	273	4.245	13	138	2.414	9	125	1.145	54	537	7.804
L1	35	273	4.116	13	136	2.389	9	125	1.159	57	534	7.664
L2	37	273	3.932	13	134	2.351	10	130	1.039	60	536	7.322
L3	39	273	3.844	13	132	2.333	10	130	1.062	62	534	7.239
V1	32	273	3.953	14	152	2.230	9	125	1.133	56	550	7.317
V2	32	273	3.978	15	161	2.071	9	125	1.179	57	559	7.227
V3	32	273	3.530	17	179	1.980	9	125	1.108	59	577	6.618
P1	32	273	4.261	13	137	2.378	10	134	1.011	56	545	7.651
P2	32	273	4.249	13	136	2.319	11	142	947	56	552	7.515
P3	32	273	4.241	13	136	2.254	12	151	957	57	559	7.452
F	37	273	3.493	17	174	1.911	10	135	997	64	582	6.401
Altura	16 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)	Concreto (m³)	Fôrmas (m²)	Aço (kg)
C40	30	270	4.479	14	140	3.777	21	216	1.824	64	626	10.079
L1	32	270	4.179	14	138	3.742	21	216	1.837	67	624	9.758
L2	35	270	3.957	14	136	3.778	21	216	1.818	69	622	9.553
L3	37	270	3.821	14	134	3.766	21	216	1.869	72	620	9.456
V1	30	270	4.086	15	153	3.315	21	216	1.749	66	639	9.149
V2	30	270	3.804	17	166	3.149	21	216	1.724	67	652	8.676
V3	30	270	3.663	18	177	3.037	21	216	1.743	68	663	8.444
P1	30	270	4.334	14	139	3.559	22	224	1.951	65	633	9.844
P2	30	270	4.359	14	138	3.360	22	232	1.970	66	640	9.689
P3	30	270	4.376	14	137	3.301	23	241	1.922	67	648	9.599
F	35	270	3.594	17	161	3.045	22	224	1.917	73	655	8.555

(fonte: TQS, adaptado pelo autor)

Os custos, seguidos de sua representatividade, para cada edificação simulada, a partir das composições do SINAPI são os respectivos:

Tabela 14: Custos (R\$) totais por serviço – segunda análise

Altura	5 Pavimentos									
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	
C40	98.030	106.304	263.483	39.139	122.937	109.462	18.736	69.103	56.013	883.208
L1	104.634	106.304	250.076	39.139	121.258	110.019	18.736	69.103	55.186	874.456
L2	111.178	106.304	244.599	39.139	119.580	113.619	18.736	69.103	55.632	877.890
L3	117.721	106.304	237.514	39.139	117.919	114.871	18.736	69.103	54.696	876.003
V1	98.030	106.304	240.403	42.956	134.088	108.210	18.736	69.103	54.525	872.355
V2	98.030	106.304	228.405	46.895	145.697	100.934	18.736	69.103	53.523	867.628
V3	97.970	106.226	219.446	51.075	157.201	99.579	18.736	69.103	52.457	871.794
P1	98.030	106.304	262.730	38.958	122.160	105.505	21.251	75.086	49.093	879.117
P2	98.030	106.304	257.754	38.715	121.453	103.474	23.577	80.534	46.866	876.707
P3	98.030	106.304	257.120	38.473	120.640	100.324	26.155	86.769	44.657	878.472
F	104.634	106.304	220.325	50.166	153.455	95.740	23.766	81.054	47.954	883.398
Altura	8 Pavimentos									
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	
C40	157.042	169.138	412.010	62.587	195.318	234.288	46.149	148.806	111.153	1.536.491
L1	168.554	169.138	399.983	62.587	192.437	232.115	46.149	148.806	112.636	1.532.405
L2	179.944	169.076	385.831	62.344	188.956	230.717	50.110	153.794	101.963	1.522.735
L3	191.395	169.076	378.696	62.344	186.093	229.820	50.110	153.794	104.612	1.525.941
V1	157.042	169.138	387.148	69.070	214.420	218.426	46.149	148.806	110.993	1.521.192
V2	157.042	169.138	389.889	73.553	227.797	203.012	46.149	148.806	115.536	1.530.922
V3	156.921	168.999	350.757	82.580	252.837	196.798	46.149	148.806	110.117	1.513.964
P1	156.982	169.084	412.349	62.163	194.028	230.143	52.185	159.613	97.870	1.534.415
P2	156.982	169.084	414.613	61.860	192.950	226.241	56.209	168.758	92.394	1.539.088
P3	156.982	169.076	413.716	61.436	191.783	219.898	60.484	178.734	93.313	1.545.423
F	179.944	169.084	347.493	81.672	245.592	190.107	52.688	160.445	99.184	1.526.208
Altura	16 Pavimentos									
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	
C40	288.153	334.815	863.899	136.503	396.608	728.567	206.853	512.093	351.779	3.819.271
L1	312.630	334.815	811.881	136.503	390.918	726.931	206.853	512.093	356.827	3.789.452
L2	337.047	334.815	770.867	136.503	385.228	735.988	206.853	512.093	354.242	3.773.636
L3	361.524	334.815	748.088	136.503	379.538	737.190	206.853	512.093	365.796	3.782.401
V1	288.153	334.815	803.685	150.135	433.876	651.991	206.853	512.093	344.044	3.725.645
V2	288.153	334.815	753.001	163.404	470.155	623.258	206.853	512.093	341.208	3.692.939
V3	288.153	334.815	726.685	175.097	501.786	602.382	206.853	512.093	345.777	3.693.641
P1	288.153	334.784	832.684	135.352	393.215	683.888	216.535	532.045	374.949	3.791.606
P2	288.153	334.761	860.722	134.261	389.840	663.453	226.218	551.996	389.076	3.838.481
P3	288.093	334.738	864.115	133.110	386.447	651.904	235.900	571.948	379.507	3.845.762
F	337.047	334.784	717.176	161.768	453.880	607.695	216.535	532.045	382.529	3.743.459

(fonte: autor)

Tabela 15: Custos (R\$) por serviço por pavimento – segunda análise

Altura	5 Pavimentos									Total
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	
C40	19.606	21.261	52.697	7.828	24.587	21.892	3.747	13.821	11.203	176.642
L1	20.927	21.261	50.015	7.828	24.252	22.004	3.747	13.821	11.037	174.891
L2	22.236	21.261	48.920	7.828	23.916	22.724	3.747	13.821	11.126	175.578
L3	23.544	21.261	47.503	7.828	23.584	22.974	3.747	13.821	10.939	175.201
V1	19.606	21.261	48.081	8.591	26.818	21.642	3.747	13.821	10.905	174.471
V2	19.606	21.261	45.681	9.379	29.139	20.187	3.747	13.821	10.705	173.526
V3	19.594	21.245	43.889	10.215	31.440	19.916	3.747	13.821	10.491	174.359
P1	19.606	21.261	52.546	7.792	24.432	21.101	4.250	15.017	9.819	175.823
P2	19.606	21.261	51.551	7.743	24.291	20.695	4.715	16.107	9.373	175.341
P3	19.606	21.261	51.424	7.695	24.128	20.065	5.231	17.354	8.931	175.694
F	20.927	21.261	44.065	10.033	30.691	19.148	4.753	16.211	9.591	176.680
Altura	8 Pavimentos									Total
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	
C40	19.630	21.142	51.501	7.823	24.415	29.286	5.769	18.601	13.894	192.061
L1	21.069	21.142	49.998	7.823	24.055	29.014	5.769	18.601	14.080	191.551
L2	22.493	21.135	48.229	7.793	23.620	28.840	6.264	19.224	12.745	190.342
L3	23.924	21.135	47.337	7.793	23.262	28.727	6.264	19.224	13.077	190.743
V1	19.630	21.142	48.393	8.634	26.802	27.303	5.769	18.601	13.874	190.149
V2	19.630	21.142	48.736	9.194	28.475	25.376	5.769	18.601	14.442	191.365
V3	19.615	21.125	43.845	10.323	31.605	24.600	5.769	18.601	13.765	189.246
P1	19.623	21.135	51.544	7.770	24.253	28.768	6.523	19.952	12.234	191.802
P2	19.623	21.135	51.827	7.732	24.119	28.280	7.026	21.095	11.549	192.386
P3	19.623	21.135	51.715	7.679	23.973	27.487	7.561	22.342	11.664	193.178
F	22.493	21.135	43.437	10.209	30.699	23.763	6.586	20.056	12.398	190.776
Altura	16 Pavimentos									Total
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	
C40	18.010	20.926	53.994	8.531	24.788	45.535	12.928	32.006	21.986	238.704
L1	19.539	20.926	50.743	8.531	24.432	45.433	12.928	32.006	22.302	236.841
L2	21.065	20.926	48.179	8.531	24.077	45.999	12.928	32.006	22.140	235.852
L3	22.595	20.926	46.756	8.531	23.721	46.074	12.928	32.006	22.862	236.400
V1	18.010	20.926	50.230	9.383	27.117	40.749	12.928	32.006	21.503	232.853
V2	18.010	20.926	47.063	10.213	29.385	38.954	12.928	32.006	21.325	230.809
V3	18.010	20.926	45.418	10.944	31.362	37.649	12.928	32.006	21.611	230.853
P1	18.010	20.924	52.043	8.460	24.576	42.743	13.533	33.253	23.434	236.975
P2	18.010	20.923	53.795	8.391	24.365	41.466	14.139	34.500	24.317	239.905
P3	18.006	20.921	54.007	8.319	24.153	40.744	14.744	35.747	23.719	240.360
F	21.065	20.924	44.824	10.111	28.367	37.981	13.533	33.253	23.908	233.966

(fonte: autor)

Tabela 16: Representatividade de custos – segunda análise

Altura	5 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço
C40	11%	12%	30%	4%	14%	12%	2%	8%	6%	18%	34%	49%
L1	12%	12%	29%	4%	14%	13%	2%	8%	6%	19%	34%	47%
L2	13%	12%	28%	4%	14%	13%	2%	8%	6%	19%	34%	47%
L3	13%	12%	27%	4%	13%	13%	2%	8%	6%	20%	33%	46%
V1	11%	12%	28%	5%	15%	12%	2%	8%	6%	18%	35%	46%
V2	11%	12%	26%	5%	17%	12%	2%	8%	6%	19%	37%	44%
V3	11%	12%	25%	6%	18%	11%	2%	8%	6%	19%	38%	43%
P1	11%	12%	30%	4%	14%	12%	2%	9%	6%	18%	35%	47%
P2	11%	12%	29%	4%	14%	12%	3%	9%	5%	18%	35%	47%
P3	11%	12%	29%	4%	14%	11%	3%	10%	5%	19%	36%	46%
F	12%	12%	25%	6%	17%	11%	3%	9%	5%	20%	39%	41%
Altura	8 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço
C40	10%	11%	27%	4%	13%	15%	3%	10%	7%	17%	33%	49%
L1	11%	11%	26%	4%	13%	15%	3%	10%	7%	18%	33%	49%
L2	12%	11%	25%	4%	12%	15%	3%	10%	7%	19%	34%	47%
L3	13%	11%	25%	4%	12%	15%	3%	10%	7%	20%	33%	47%
V1	10%	11%	25%	5%	14%	14%	3%	10%	7%	18%	35%	47%
V2	10%	11%	25%	5%	15%	13%	3%	10%	8%	18%	36%	46%
V3	10%	11%	23%	5%	17%	13%	3%	10%	7%	19%	38%	43%
P1	10%	11%	27%	4%	13%	15%	3%	10%	6%	18%	34%	48%
P2	10%	11%	27%	4%	13%	15%	4%	11%	6%	18%	34%	48%
P3	10%	11%	27%	4%	12%	14%	4%	12%	6%	18%	35%	47%
F	12%	11%	23%	5%	16%	12%	3%	11%	6%	21%	38%	42%
Altura	16 Pavimentos											
Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço
C40	8%	9%	23%	4%	10%	19%	5%	13%	9%	17%	33%	51%
L1	8%	9%	21%	4%	10%	19%	5%	14%	9%	17%	33%	50%
L2	9%	9%	20%	4%	10%	20%	5%	14%	9%	18%	33%	49%
L3	10%	9%	20%	4%	10%	19%	5%	14%	10%	19%	32%	49%
V1	8%	9%	22%	4%	12%	18%	6%	14%	9%	17%	34%	48%
V2	8%	9%	20%	4%	13%	17%	6%	14%	9%	18%	36%	47%
V3	8%	9%	20%	5%	14%	16%	6%	14%	9%	18%	37%	45%
P1	8%	9%	22%	4%	10%	18%	6%	14%	10%	17%	33%	50%
P2	8%	9%	22%	3%	10%	17%	6%	14%	10%	17%	33%	50%
P3	7%	9%	22%	3%	10%	17%	6%	15%	10%	17%	34%	49%
F	9%	9%	19%	4%	12%	16%	6%	14%	10%	19%	35%	46%

(fonte: autor)

Tabela 17: Resumo de custos (R\$) totais e MO – segunda análise

Custo Total (R\$)	Altura		
	5 Pavs	8 Pavs	16 Pavs
Simulação			
C40	883.208	1.536.491	3.819.271
L1	874.456	1.532.405	3.789.452
L2	877.890	1.522.735	3.773.636
L3	876.003	1.525.941	3.782.401
V1	872.355	1.521.192	3.725.645
V2	867.628	1.530.922	3.692.939
V3	871.794	1.513.964	3.693.641
P1	879.117	1.534.415	3.791.606
P2	876.707	1.539.088	3.838.481
P3	878.472	1.545.423	3.845.762
F	883.398	1.526.208	3.743.459

MO (R\$)	Altura		
	5 Pavs	8 Pavs	16 Pavs
Simulação			
C40	116.190	196.505	461.438
L1	115.222	195.925	462.396
L2	114.791	196.253	462.291
L3	115.261	197.190	463.082
V1	118.242	201.875	471.951
V2	122.050	205.608	482.900
V3	124.506	211.148	490.383
P1	117.066	199.689	469.165
P2	118.005	201.535	474.144
P3	119.124	203.806	477.493
F	127.275	214.775	489.715

(fonte: autor)

Tabela 18: Resumo de custos (R\$) totais por pavimento – segunda análise

Custo por pav. (R\$)	Altura		
	5 Pavs	8 Pavs	16 Pavs
Simulação			
C40	176.642	192.061	238.704
L1	174.891	191.551	236.841
L2	175.578	190.342	235.852
L3	175.201	190.743	236.400
V1	174.471	190.149	232.853
V2	173.526	191.365	230.809
V3	174.359	189.246	230.853
P1	175.823	191.802	236.975
P2	175.341	192.386	239.905
P3	175.694	193.178	240.360
F	176.680	190.776	233.966

(fonte: autor)

Tabela 19: Resumo de custos (R\$) por pavimento – pilares vs. ligas + lajes

Altura	Custos totais 5 pavimentos					Custos relativos			
Material	Lajes	Vigas	Lajes + Vigas	Pilares	Total	Lajes	Vigas	Lajes + Vigas	Pilares
C40	93.563	54.308	147.871	28.771	176.642	53%	31%	84%	16%
L1	92.203	54.083	146.286	28.605	174.891	53%	31%	84%	16%
L2	92.416	54.468	146.884	28.694	175.578	53%	31%	84%	16%
L3	92.308	54.386	146.694	28.507	175.201	53%	31%	84%	16%
V1	88.947	57.051	145.998	28.473	174.471	51%	33%	84%	16%
V2	86.548	58.705	145.253	28.273	173.526	50%	34%	84%	16%
V3	84.728	61.571	146.299	28.059	174.359	49%	35%	84%	16%
P1	93.413	53.325	146.737	29.086	175.823	53%	30%	83%	17%
P2	92.418	52.728	145.146	30.196	175.341	53%	30%	83%	17%
P3	92.291	51.887	144.178	31.516	175.694	53%	30%	82%	18%
F	86.253	59.872	146.125	30.555	176.680	49%	34%	83%	17%
Altura	Custos totais 8 pavimentos					Custos relativos			
Material	Lajes	Vigas	Lajes + Vigas	Pilares	Total	Lajes	Vigas	Lajes + Vigas	Pilares
C40	92.274	61.524	153.798	38.264	192.061	48%	32%	80%	20%
L1	92.209	60.892	153.102	38.449	191.551	48%	32%	80%	20%
L2	91.856	60.252	152.109	38.233	190.342	48%	32%	80%	20%
L3	92.396	59.782	152.178	38.565	190.743	48%	31%	80%	20%
V1	89.166	62.739	151.905	38.244	190.149	47%	33%	80%	20%
V2	89.509	63.045	152.554	38.811	191.365	47%	33%	80%	20%
V3	84.585	66.527	151.112	38.134	189.246	45%	35%	80%	20%
P1	92.302	60.792	153.093	38.709	191.802	48%	32%	80%	20%
P2	92.585	60.131	152.716	39.670	192.386	48%	31%	79%	21%
P3	92.472	59.140	151.611	41.566	193.178	48%	31%	78%	22%
F	87.065	64.671	151.736	39.040	190.776	46%	34%	80%	20%
Altura	Custos totais 16 pavimentos					Custos relativos			
Material	Lajes	Vigas	Lajes + Vigas	Pilares	Total	Lajes	Vigas	Lajes + Vigas	Pilares
C40	92.929	78.855	171.784	66.920	238.704	39%	33%	72%	28%
L1	91.208	78.397	169.605	67.236	236.841	39%	33%	72%	28%
L2	90.171	78.607	168.778	67.074	235.852	38%	33%	72%	28%
L3	90.277	78.327	168.604	67.796	236.400	38%	33%	71%	29%
V1	89.166	77.250	166.416	66.437	232.853	38%	33%	71%	29%
V2	85.998	78.551	164.549	66.260	230.809	37%	34%	71%	29%
V3	84.353	79.954	164.307	66.545	230.853	37%	35%	71%	29%
P1	90.976	75.778	166.755	70.221	236.975	38%	32%	70%	30%
P2	92.727	74.222	166.949	72.956	239.905	39%	31%	70%	30%
P3	92.934	73.216	166.150	74.210	240.360	39%	30%	69%	31%
F	86.813	76.459	163.272	70.694	233.966	37%	33%	70%	30%

(fonte: autor)

4.3.2 Análise

Todas as análises a seguir serão feitas comparando situações em que os componentes estruturais têm suas dimensões de seção transversal aumentadas em relação à configuração de resistência considerada ótima para os custos totais da estrutura, a configuração com concreto C40.

Em relação às lajes, o aumento de sua espessura provoca obviamente um aumento no consumo de concreto, a manutenção do consumo de fôrmas e uma redução no consumo

de aço, para todas as configurações de altura da estrutura. Por outro lado, o aumento na altura das seções transversais das vigas não tem influência sobre o consumo de concreto e fôrmas das lajes, mas gera uma redução no consumo de aço das lajes. Como comportamento geral, quanto maior o aumento na altura das vigas, menor o consumo de aço nas lajes. Tal fato se deve à estrutura do edifício ser altamente hiperestática, e, em estruturas hiperestáticas, o aumento relativo da rigidez de um componente em relação aos demais provoca um aumento na solicitação nesse componente e uma diminuição nas solicitações nos demais.

O comportamento em flexão das lajes tem forte acoplamento ao comportamento em flexão das vigas, de forma que nervuras (vigas) mais rígidas geram uma diminuição nos esforços suportados pelas lajes. Por outro lado, o aumento das dimensões das seções transversais dos pilares tem pouca influência sobre o consumo de aço das lajes, que permaneceu praticamente constante, evidenciando o pouco acoplamento do comportamento em flexão das lajes com a rigidez dos pilares.

A configuração com aumento combinado das dimensões dos componentes (F) resultou numa diminuição do consumo de aço das lajes em relação à configuração inicial, pois tanto o aumento da espessura das lajes quanto o da altura das vigas provoca diminuição do consumo de aço nas lajes. A redução do consumo de aço foi maior para essa configuração do que para qualquer outra configuração em que somente um componente estrutural teve suas dimensões aumentadas.

O aumento da espessura das lajes não provocou alteração no volume de concreto consumido nas vigas, indicando que as dimensões transversais das vigas, em especial a altura, não precisaram ser alteradas. Há uma pequena redução no consumo de fôrmas das vigas com o aumento da espessura das lajes uma vez que, mantendo a altura total das vigas inalterada (o que inclui a parte da viga embutida nas lajes), a altura das nervuras salientes em relação ao fundo das lajes diminui no mesmo valor com que a espessura das lajes aumentou, provocando uma pequena diminuição no consumo de fôrmas. O consumo de aço das vigas ficou aproximadamente estável com o aumento da espessura das lajes, indicando que, no acoplamento do comportamento em flexão de lajes e vigas, o aumento da rigidez das vigas em relação às lajes tem maior influência que o contrário.

O aumento da altura da seção transversal das vigas provocou alterações significativas nos consumos de materiais desses componentes. O consumo de concreto e fôrmas aumentou e o consumo de aço diminuiu, como esperado.

Para as vigas, o aumento das dimensões das seções transversais dos pilares resultou em aproximadamente nenhuma alteração no consumo de concreto e de fôrmas, mas numa diminuição do consumo de aço. Ao aumentar a rigidez dos pilares em relação às vigas, o engastamento das vigas nos pilares se torna mais efetivo, reduzindo flechas e as solicitações. Para uma mesma carga e vão, uma viga bi-apoiada tem flechas e solicitações de flexão maiores que uma viga bi-engastada, e o aumento da rigidez dos pilares provocou uma aproximação do comportamento dos tramos das vigas à configuração bi-engastada.

Também para as vigas, a aplicação simultânea do aumento das seções transversais dos diversos componentes levou a um consumo de aço menor ou pelo menos igual em relação a qualquer outra configuração testada, embora isso tenha sido obtido com o aumento do consumo de concreto e de fôrmas, devido principalmente ao aumento de dimensões das seções transversais das próprias vigas.

Em relação aos pilares, o aumento da espessura das lajes gera dois mecanismos antagônicos em relação ao consumo de materiais: devido à colaboração entre lajes e vigas, o aumento da espessura das lajes provoca um aumento da rigidez dos tramos horizontais das estruturas de contraventamento, aliviando os pilares; por outro lado, o aumento da espessura das lajes aumenta a carga permanente atuante na estrutura, aumentando as solicitações em vigas e pilares. Nos resultados obtidos, para as configurações com 5 e 8 pavimentos, o comportamento geral é uma diminuição no consumo de aço dos pilares com o aumento da espessura das lajes, com oscilações. Já para a estrutura com 16 pavimentos, houve como comportamento geral um aumento do consumo de aço nos pilares com o aumento da espessura das lajes, com oscilações.

O aumento na altura das vigas tem os mesmos dois mecanismos conflitantes das lajes em relação aos pilares, mas com o aumento do peso da estrutura sendo consideravelmente menor para o aumento das seções das vigas que com o aumento da espessura das lajes. O resultado foi que, aumentado a altura das seções transversais das

vigas, o consumo de concreto e fôrmas dos pilares permaneceu constante, e houve uma leve redução do consumo de aço, com oscilações.

O aumento das dimensões das seções transversais dos pilares obviamente levou a um maior consumo de concreto e fôrmas nesses elementos, mas para as estruturas de 5 e 8 pavimentos, isso correspondeu a uma redução no consumo de aço. Contudo, para a estrutura com 16 pavimentos, o aumento das seções dos pilares levou a um aumento do consumo de aço. Isso pode ser explicado pelo fato de os pilares terem seção transversal constante ao longo da altura, estando com armadura mínima nos andares superiores. O aumento da seção transversal dos pilares propiciou uma redução na taxa de armadura dos tramos inferiores, onde as solicitações são maiores, e um aumento da quantidade de armadura nos tramos superiores, com armadura mínima, uma vez que esta é proporcional à área da seção bruta de concreto.

Finalmente, ainda para pilares, o aumento combinado das seções transversais dos diversos componentes não levou ao menor consumo possível de aço dos pilares, e sim a uma situação intermediária entre a configuração original C40 e as configurações obtidas com apenas os pilares sofrendo aumento de seção. Apenas na configuração de 16 pavimentos foi possível obter um menor consumo de aço para os pilares aumentando as seções das vigas, unicamente.

Para edificações simuladas com concreto de 40 MPa, existe uma mudança no padrão de custos para as diferentes elevações da estrutura. Quanto aos elementos estruturais, a representatividade do orçamento de pilares aumenta à medida que o número de pavimentos cresce – média de 17% para 5 pavimentos, e de 29% para 16. Ao mesmo tempo, o custo de aço para vigas é, também, percebido aumentar – de 12% para 19%.

Em relação aos materiais utilizados, a representatividade de aço – em torno de 49% – e concreto – 17% – manteve-se relativamente constante para as 3 alturas. Desta forma, o consumo de aço torna-se o custo mais sensível para as edificações estudadas.

Portanto, proporcionar um maior braço de alavanca para as vigas a partir do aumento de seções se traduz em economia de volume de aço. O impacto deste movimento, juntamente com o aumento da espessura para lajes, mostrou-se como melhor meio de se obter economia quando acrescidas as dimensões dos elementos estruturais.

Torna-se claro que, quanto maiores as alturas das edificações, maiores são os impactos nominais das otimizações de cada elemento, haja vista a oportunidade de réplica otimizada de cada pavimento. Ao mesmo tempo, edificações de maiores alturas são majoritariamente dimensionadas pelo critério de estabilidade global e deslocamentos horizontais. Com as solicitações e efeitos locais em segundo plano, cria-se um espaço para otimizar, seja em suas dimensões, seja em resistência de concreto, os elementos menos relevantes para estabilidade global.

O modelo denominado final (F) buscou obter a maior economia de custos consolidando nele as dimensões de lajes, pilares e vigas que proporcionaram as maiores economias independentemente. A Tabela 17 indica (em negrito) os acréscimos de dimensões que originaram as maiores economias para cada altura estudada. Contrainstintivamente, nota-se que, agregando todos os acréscimos mais econômicos em um mesmo modelo, os orçamentos finais não foram os mais econômicos do que os modelos originados por acréscimos independentes – inclusive, para a edificação de 5 pavimentos, o custo total da tentativa final de otimização foi maior do que o orçamento inicial, gerado a partir do método de seções mínimas, em 4.1.

Os quantitativos exibidos na Tabela 12 e estimativas de custos na Tabela 14 retratam o menor custo total para edificações simuladas anteriormente em relação às edificações finais. Nestas últimas simulações, o consumo de concreto, e fôrmas, aumentou consideravelmente, a ponto gerar custos não compensados pela redução do consumo de armaduras. Para os pavimentos mais altos, a utilização de maior resistência de concreto implicou em aumento de consumo e custo de aço, uma vez que os pilares destes pavimentos são dimensionados à taxa de armadura mínima, e tais taxas são determinadas pela resistência (f_{ck}) do elemento (item 17.3.5.2, NBR 6118:2014).

para edificações que possuem muitos elementos dimensionados à taxa mínima de armadura

Outro ponto é que a edificação passa a receber mais cargas, o que pode implicar em um aumento de dimensões além das cargas iniciais por conta do peso próprio de pavimentos acima. A modelagem final, feita a partir da composição dos acréscimos mais benéficos economicamente (ou que resultaram em maiores economias para a estrutura simulada) para cada elemento (pilar, viga e laje), exigiu aumento dos pilares por conta

das solicitações geradas pelo acréscimo de dimensões (e conseqüentemente cargas) de vigas e lajes.

Neste sentido, inclina-se a inferir que é de mais valia buscar a redução de consumo de aço apenas para os elementos estruturais mais relevantes, e não para todos, quando visada a configuração mais vantajosa economicamente para os custos estruturais das edificações. Para atingir o menor orçamento, então, é indicado evitar o abuso de sobrecarga estrutural, ocasionada pelo superdimensionamento dos elementos.

Uma outra conclusão obtida a partir da análise de custos, e não de quantitativos, é que o aumento da espessura das lajes em até 3cm gera estruturas mais baratas que com as lajes em sua espessura mínima, além de proporcionar melhor desempenho térmico, acústico e de vibrações para a edificação. Logo, a diretriz de dimensionamento para lajes de obter a espessura mínima, visando que a redução no consumo de concreto e nas cargas permanentes leve a um custo menor, não necessariamente é correta.

Ainda, analisando as taxas de armaduras para cada uma das simulações, observa-se que reduzir a taxa de armadura desenfreadamente não implica em reduções sucessivas de custos globais para a edificação, como é o caso das simulações finais, em que houve drástica redução de taxa de armaduras (em kg/m³, Tabela 20) e aumento de orçamento.

Tabela 20: Consumo de aço (kg) por volume de concreto (m³)

kg/m ³ Simulação	Altura		
	5 Pavs	8 Pavs	16 Pavs
C40	138,0	143,2	156,6
L1	127,3	134,8	145,9
L2	121,3	122,1	137,6
L3	113,9	116,2	131,4
V1	125,4	131,1	139,1
V2	114,4	127,4	129,2
V3	107,6	113,0	123,5
P1	132,4	137,6	151,0
P2	126,5	133,4	146,7
P3	123,0	130,5	143,5
F	98,3	99,3	117,2

(fonte: autor)

4.4 Terceira análise: Diferentes resistências entre elementos estruturais

Na terceira, e última, análise realizada, propôs-se utilizar uma resistência à compressão de concreto para os pilares diferente daquela para vigas e lajes. Para os elementos estruturais verticais, optou-se pela resistência máxima de concretos do Grupo I de 50 MPa. Já para vigas e lajes, utilizou-se a resistência mínima requerida por norma para edificações classificadas como CAA II (25 MPa). Três simulações foram estudadas: 5, 8 e 16 pavimentos.

4.4.1 Quantitativos e estimativas de custo

Volumes de concreto são lidos em m³, fôrmas em m² e aço em kg.

Tabela 21: Quantitativos – terceira análise

Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
	Concreto	Fôrmas	Aço									
5 Pavimentos	194	1.373	20.389	65	667	10.584	31	473	3.670	289	2.512	34.643
8 Pavimentos	316	2.184	31.904	103	1.051	24.771	74	1.008	7.664	493	4.243	64.339
16 Pavimentos	597	4.328	61.431	217	2.130	62.778	395	3.741	31.989	1.210	10.199	156.198

(fonte: TQS, adaptado pelo autor)

Tabela 22: Quantitativos por pavimento – terceira análise

Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
	Concreto	Fôrmas	Aço									
5 Pavimentos	39	275	4.078	13	133	2.117	6	95	734	58	502	6.929
8 Pavimentos	40	273	3.988	13	131	3.096	9	126	958	62	530	8.042
16 Pavimentos	37	271	3.839	14	133	3.924	25	234	1.999	76	637	9.762

(fonte: TQS, adaptado pelo autor)

Tabela 23: Custos (R\$) totais por serviço – terceira análise

Material	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Total
5 Pavimentos	101.512	106.304	248.652	33.750	117.795	129.080	21.506	70.143	44.753	873.494
8 Pavimentos	165.094	169.138	385.978	53.708	185.705	299.680	52.108	149.638	92.720	1.553.769
16 Pavimentos	312.007	335.117	746.149	113.581	376.339	762.516	278.523	555.322	388.540	3.868.094

(fonte: autor)

Tabela 24: Custos (R\$) por serviço por pavimento – terceira análise

Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total
	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	Concreto	Fôrmas	Aço	
5 Pavimentos	20.302	21.261	49.730	6.750	23.559	25.816	4.301	14.029	8.951	174.699
8 Pavimentos	20.637	21.142	48.247	6.713	23.213	37.460	6.514	18.705	11.590	194.221
16 Pavimentos	19.500	20.945	46.634	7.099	23.521	47.657	17.408	34.708	24.284	241.756

(fonte: autor)

Tabela 25: Representatividade de custos – terceira análise

Elemento	Lajes			Vigas			Pilares			Total		
	Concreto	Fôrmas	Aço									
5 Pavimentos	12%	12%	28%	4%	13%	15%	2%	8%	5%	18%	34%	48%
8 Pavimentos	11%	11%	25%	3%	12%	19%	3%	10%	6%	17%	32%	50%
16 Pavimentos	8%	9%	19%	3%	10%	20%	7%	14%	10%	18%	33%	49%

(fonte: autor)

Tabela 26: Resumo de custos (R\$) por pavimento – pilares vs. ligas + lajes

Material	Lajes	Vigas	Lajes + Vigas	Pilares	Total	Lajes	Vigas	Lajes + Vigas	Pilares
5 Pavimentos	91.293	56.125	147.418	27.280	174.699	52%	32%	84%	16%
8 Pavimentos	144.042	107.818	251.861	58.893	310.754	46%	35%	81%	19%
16 Pavimentos	278.655	250.487	529.142	244.477	773.619	36%	32%	68%	32%

(fonte: autor)

4.4.2 Análise

Com a diminuição da resistência de concreto para lajes e vigas, observa-se a menor rigidez da edificação quando comparada a edificações modeladas totalmente com concreto de 50 MPa. A diminuição da resistência de concreto também implicou na necessidade de acréscimo de seção de lajes. Este acréscimo de dimensões resultou em maior peso próprio para lajes, que tiveram de ser sustentadas por pilares mais robustos. Desta forma, a diminuição de rigidez da estrutura, somada ao aumento de cargas derivadas de peso próprio, tiveram de ser compensados pelo aumento de seções dos pilares, a fim de atender os critérios tanto de estabilidade global e deslocamentos horizontais como de solicitações locais. Este incremento de dimensões resultou em maior volume de concreto utilizado e, por conseguinte, maiores custos. Este efeito é amplificado à medida que a altura da edificação é elevada. Por conta disto, nota-se significativo aumento de representatividade dos pilares nos custos à medida que aumentamos a altura da edificação (Tabela 26).

Um aspecto importante de ser ressaltado aqui é o fenômeno de hiperestaticidade já comentado em 4.3.2, já que a rigidez dos pilares, em relação às lajes e vigas, é aumentada consideravelmente – tanto pelo aumento de suas dimensões quanto de resistência de concreto). Quando analisados os resultados por pavimento, observamos novamente um resultado também já encontrado em 4.2.2, e graficado previamente na Figura 8, onde o aumento de custos para as edificações se deu exponencialmente conforme a altura das estruturas fora aumentada. Na ocasião desta terceira análise, tal incremento de custos foi guiado principalmente pelo custo de pilares.

Para a configuração de planta e tipo de edificação analisada, a utilização de concretos mais resistentes em pilares e de menor qualidade em lajes e vigas não resultou em economia de custos totais. A Tabela 23 mostra que, embora tenha-se atingido a economia para lajes e vigas desejada – pelo aumento de seções e diminuição de custos em aço por conta de um menor f_{ck} de concreto –, os pilares foram muito penalizados pela sobrecarga inerente, tanto em volume de concreto como em necessidade de armaduras.

Comparando com os resultados obtidos na primeira análise realizada neste trabalho (Tabela 4), observa-se que, para alturas de 8 e 16 pavimentos, utilizar concretos mais resistentes em pilares e menos em vigas e lajes resulta em um ganho de economia quando comparado à utilização do concreto menos resistente (25 MPa) na totalidade da edificação; contudo, tais ganhos não superam os obtidos quando utilizado um de maior resistência (40 MPa, por exemplo). Para a simulação de 5 pavimentos, utilizar do método apresentado na terceira análise resultou maiores economias em relação à primeira análise; porém, é preferível aumentar as dimensões de certos elementos se menores orçamentos forem objetivados (Tabela 14).

4.5 Comparativo entre soluções

O aumento da resistência do concreto (avaliado em 4.1) se mostrou mais impactante do que o aumento das seções dos elementos (4.3), principalmente porque os pilares (dimensionados a compressão) apresentaram grandes reduções conforme a qualidade do concreto fora aumentada. Limitando-se a específica planta desenhada e o arranjo de número de pavimentos em conjunto com resistências à compressão do concreto estudados neste trabalho, bem como o momento de mercado atual, é possível afirmar que aumentar a resistência do concreto (4.1) resultou em uma maior economia de custo em relação a outra solução considerada (4.3). Ainda, utilizar-se de diferentes resistências de concreto (4.4) para cada elemento estrutural não resultou em economias tão grandes quanto às encontradas em primeira e segunda análise.

A maior economia de custo obtida pelo primeiro método foi preponderante sobre a segunda e terceira análise para edificações de 8 e 16 pavimentos. Já, para a altura de 5 pavimentos, o aumento das seções em 4.3 resultou em maiores economias de custo. O resumo das economias obtidas para todas as simulações orçadas é exposto na tabela abaixo:

Tabela 27: Variação de custo total para os métodos analisados

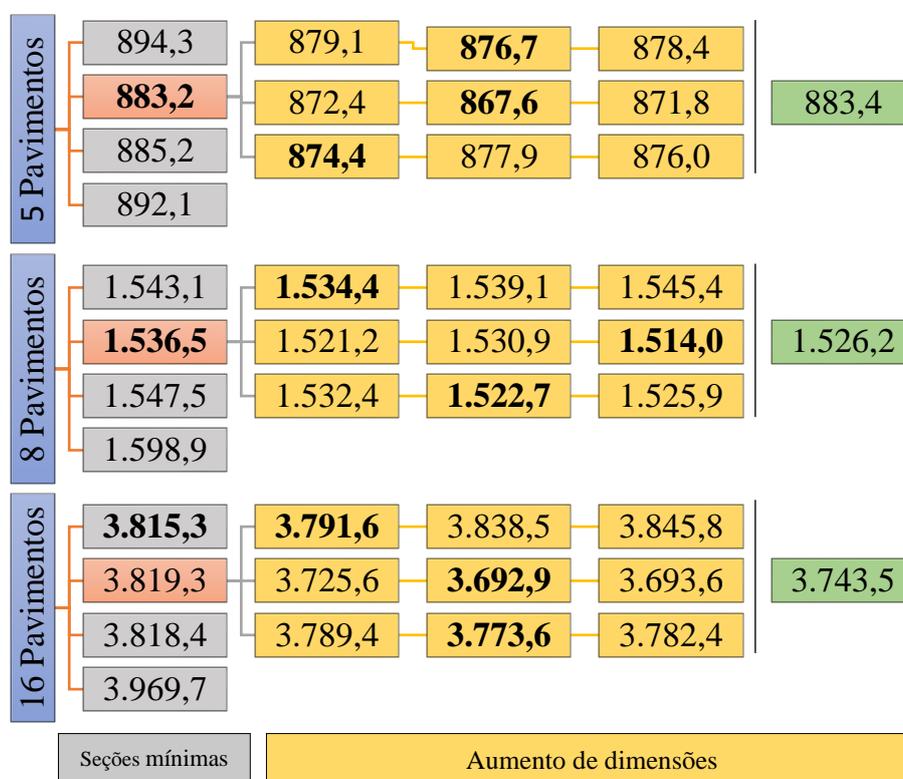
Variação de custo (%)		Altura		
Resistência		5 Pavs	8 Pavs	16 Pavs
25 MPa		Base	Base	Base
35 MPa		-0,8%	-3,2%	-3,8%
40 MPa		-1,0%	-3,9%	-3,8%
50 MPa		0,2%	-3,5%	-3,9%
Variação de custo (%)		Altura		
Simulação		5 Pavs	8 Pavs	16 Pavs
C40		Base	Base	Base
L1		-1,0%	-0,3%	-0,8%
L2		-0,6%	-0,9%	-1,2%
L3		-0,8%	-0,7%	-1,0%
V1		-1,2%	-1,0%	-2,5%
V2		-1,8%	-0,4%	-3,3%
V3		-1,3%	-1,5%	-3,3%
P1		-0,5%	-0,1%	-0,7%
P2		-0,7%	0,2%	0,5%
P3		-0,5%	0,6%	0,7%
F		0,0%	-0,7%	-2,0%
Variação de custo (%)		Altura		
Simulação		5 Pavs	8 Pavs	16 Pavs
C40		Base	Base	Base
Pilares 50 MPa; Vigas e Lajes 25 MPa		-1,1%	1,1%	1,3%

(fonte: autor)

O aumento das seções, embora resulte em um maior consumo de volume de concreto, pode ser benéfico à edificação à medida que o consumo de aço é reduzido. Tal redução de aço, na maioria das vezes – porém não em todas – compensa economicamente o aumento de consumo concreto, uma vez que seu custo é mais sensível ao orçamento da estrutura. Tal observação sugere que a escolha entre utilizar um ou outro método é influenciada pela situação de mercado no momento da orçamentação.

Retomando o esquema apresentado no capítulo 3.7 (Figura 3: Esquema de simulações estudadas), os custos finais das simulações são apresentados:

Figura 9: Esquema de simulações estudadas – custos (em R\$ milhares)



(fonte: autor)

5 CONCLUSÃO

Os elementos mais beneficiados pelo aumento da resistência do concreto foram aqueles onde os esforços dimensionantes foram os de compressão, i.e., pilares, alinhado com os resultados encontrados por Paula (2017), que há concluído que o emprego do concreto de mais alta resistência é mais vantajoso no caso de elementos estruturais submetidos à compressão.

Torna-se claro o antagonismo de economia entre elementos dimensionados à flexão (tendo seu maior colaborante as armaduras em aço – lajes e vigas) e à compressão (pilares). Para elementos dimensionados principalmente à flexão, a resistência do concreto gerou impacto menos relevante do que àqueles em que a compressão é predominante. Por outro lado, o aumento do braço de alavanca obtido pelo aumento de seções os beneficia em termos quantitativos e econômicos; neste estudo, pôde-se obter até 3,3% de economia para edificações de maior altura. Salienta-se que a economia de serviços proporcionada pela adequada resistência do concreto escolhida é amplificada pelo número de pavimentos que a edificação possui.

Uma maior resistência de concreto possibilita reduções nas seções dos elementos estruturais da edificação. Menores seções de peças implicam em reduções de volume de concreto total na estrutura; porém, estas reduções não necessariamente se traduzem em economia de custo total da edificação, uma vez que o aço possui relevante representatividade – avaliada em 50% neste trabalho. Isto se deve ao conseqüente maior consumo de aço, requerido pela restrição de seções para, principalmente, elementos à flexão.

A elevação do número de pavimentos nas edificações analisadas traz consigo uma mudança de paradigma de dimensionamento. Percebe-se grande sensibilidade à critérios de estabilidade global e deslocamentos horizontais conforme a altura da edificação é elevada; à medida que aumentamos o número de andares, cargas de vento tornam-se cada vez mais importantes para o dimensionamento da edificação, substituindo limitações por critérios locais, encontrados em estruturas mais baixas. De maneira geral, o aumento da altura das edificações se traduz em um aumento exponencial de custos por pavimento.

A primeira análise realizada neste trabalho (4.1) apontou o concreto C40 como mais vantajoso, para 5 e 8 pavimentos, quando dimensionada a estrutura sob seções mínimas. Para 16 pavimentos, esta resistência se apresentou igualmente vantajoso que concretos C35 e C50.

Os resultados deste trabalho exibidos em 4.3 sugerem maiores benefícios para os elementos pilares quando aumentada a resistência de concreto. Por outro lado, aumentar as seções de vigas e lajes é uma opção mais vantajosa do que acrescer dimensões de elementos verticais da estrutura. O aumento combinado de dimensões em nenhum caso implicou nas soluções mais econômicas para as edificações estudadas, já que os custos de concreto e fôrmas superaram as economias geradas pelo menor consumo de aço.

Outrossim, a diminuição acentuada do consumo de aço originado pela abundância de volumes de concreto não alcançou resultados mais econômicos. Sendo assim, extremos de menor taxa de aço ou menor volume de concreto talvez não sejam tão interessantes para fins de economia nos custos estruturais de uma edificação, embora sejam soluções simples.

Este trabalho não se propôs a analisar os impactos que a variação dimensional dos elementos estruturais gera em características físicas da edificação, mas apenas em seu custo. Dito isto e sob a ótica global da edificação, pode também ser vantajosa a implementação de maiores seções/volumes de concreto por conta de benefícios não diretamente orçamentários. O aumento da espessura das lajes pode beneficiar a estrutura no que tange problemas de esmagamento de alvenaria de vedação por encunhamento, deslocamentos horizontais e verticais, estabilidade geral da edificação, bem como gerar benefícios acústicos e térmicos a ela.

Cabe destacar que o impacto sobre os custos de uma edificação do volume de aço e concreto é relativo com o momento econômico da construção, sugerindo priorizar a economia de material conforme o custo unitário que este apresenta no momento. Também, diferentes parâmetros e escolhas de projeto (e.g. dimensões de planta, a opção por lajes maciças ou nervuradas) acarretariam resultados, e possivelmente conclusões, diferentes.

Como desenvolvimentos futuros, aponta-se a possibilidade otimizar as seções de pilares à medida que se eleva a altura da estrutura. Igualmente, avaliar diferentes

alternativas quanto a reutilização de fôrmas (aqui apenas foi trabalhado com duas reutilizações por fôrma, o que não é necessariamente comum para edificações de 5 e 16 pavimentos) é uma opção interessante. Alternativas de projeto, como o número de pavimentos, o tipo de uso (residencial ou comercial), o tipo de estrutura de contraventamento (somente pórticos ou pórticos associados a pilares-parede ou núcleos rígidos) e o sistema construtivo das lajes (lajes maciças ou nervuradas) poderiam ser igualmente contempladas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014. P. 114

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais. Rio de Janeiro, 2015.

BERNARDO, J. N. D. **Análise da influência da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) no dimensionamento estrutural de um edifício residencial em concreto armado**. Artigo submetido ao Curso de Engenharia Civil da UNESC – como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil, 2011.

Caixa Econômica Federal. **Manual de metodologias e conceitos**. Disponível em: https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_754. Acesso em: 22 de set. de 2022.

Caixa Econômica Federal. **SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – Referencial de insumos e composições**. Disponível em: https://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-a-partir-jul-2009-rs/SINAPI_ref-Insumos_Composicoes_RS_012022_NaoDesonerado.zip. Acesso em: 22 de set. de 2022.

DAL MOLIN, D. C. C.; WOLF, J. **Viabilidade técnico-econômica da utilização de concreto de alta resistência em edifícios altos**. In: ENCONTRO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO, 10, Gramado, 1990. Anais...Porto Alegre: SERGS. p. 853-863.

MATIAS, Fernanda (2019). **Avaliação da influência da resistência à compressão do concreto no custo do sistema estrutural de um edifício de cinco pavimentos**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

OLIVEIRA, D. M.; SILVA, N. A.; BREMER, C. F.; INOUE, H. **Considerações sobre a determinação do coeficiente Gama-Z**. In Revista do IBRACON de estruturas e materiais. Volume 6, número 1 (fevereiro 2013), p. 75-100.

SANTOS J. S.; SEELBACH, L. C; ROHDEN, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. **Viabilidade técnico-econômica da utilização de concreto de alto desempenho em pilares de um edifício de trinta pavimentos – estudo de caso: estrutura aporricada com resistência à compressão fixa x variada ao longo dos pavimentos**. In: Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto CBC, 2015.

TQS. **Software definitivo para engenharia de estruturas**. 2022. Disponível em: <https://www.tqs.com.br/>. Acesso em 05 de mar. de 2022.

ANEXO A – Combinações de cargas

1. ELU1/PERMACID/PP+PERM+ACID
2. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT1
3. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT2
4. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT3
5. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT4
6. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT5
7. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT6
8. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT7
9. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT8
10. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT9
11. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT10
12. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT11
13. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT12
14. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.8ACID+VENT1
15. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.8ACID+VENT2
16. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.8ACID+VENT3
17. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.8ACID+VENT4
18. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.8ACID+VENT5
19. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.8ACID+VENT6
20. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.8ACID+VENT7
21. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.8ACID+VENT8
22. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.8ACID+VENT9
23. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.8ACID+VENT10
24. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.8ACID+VENT11
25. ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.8ACID+VENT12
26. FOGO/PERMVAR/PP+PERM+0.6ACID
27. ELS/CFREQ/PP+PERM+0.7ACID
28. ELS/CFREQ/PP+PERM+0.6ACID+0.3VENT1
29. ELS/CFREQ/PP+PERM+0.6ACID+0.3VENT2
30. ELS/CFREQ/PP+PERM+0.6ACID+0.3VENT3
31. ELS/CFREQ/PP+PERM+0.6ACID+0.3VENT4
32. ELS/CFREQ/PP+PERM+0.6ACID+0.3VENT5
33. ELS/CFREQ/PP+PERM+0.6ACID+0.3VENT6

34. ELS/CFREQ/PP+PERM+0.6ACID+0.3VENT7
35. ELS/CFREQ/PP+PERM+0.6ACID+0.3VENT8
36. ELS/CFREQ/PP+PERM+0.6ACID+0.3VENT9
37. ELS/CFREQ/PP+PERM+0.6ACID+0.3VENT10
38. ELS/CFREQ/PP+PERM+0.6ACID+0.3VENT11
39. ELS/CFREQ/PP+PERM+0.6ACID+0.3VENT12
40. ELS/CQPERM/PP+PERM+0.6ACID
41. COMBFLU/COMBFLU/PP+PERM+0.6ACID

ANEXO B – Itens de custo e composições

92510 - montagem e desmontagem de fôrma de laje maciça, pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 2 utilizações. af_09/2020

Tipo	Cód. item	Desc. item	Unidade	Origem de preço	Coef.	Preço Unitário	Custo total (/m ²)
insumo	2692	desmoldante protetor para fôrmas de madeira, de base oleosa emulsificada em água	l	coef. de representatividade	0,010	R\$ 5,91	R\$ 0,05
insumo	10749	locação de escora metálica telescópica, com altura regulável de ~1,80" a ~3,20" m, com capacidade de carga de no mínimo 1000 kgf (10 kn), incluso tripe e ferragens	mes	coef. de representatividade	0,397	R\$ 11,45	R\$ 4,54
insumo	40270	viga de escoramento h20, de madeira, peso de 5,00 a 5,20 kg/m, com extremidades plásticas	m	atribuído SP	0,030	R\$ 96,18	R\$ 2,88
composição	88239	ajudante de carpinteiro com encargos complementares	h	coef. de representatividade	0,126	R\$ 18,79	R\$ 2,36
composição	88262	carpinteiro de fôrmas com encargos complementares	h	coletado	0,687	R\$ 22,53	R\$ 15,47
composição	92267	fabricação de fôrma para lajes, em chapa de madeira compensada resinada, e = 17 mm. af_09/2020	m2	coef. de representatividade	0,577	R\$ 90,36	R\$ 52,13

92769 - armação de laje de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço ca-50 de 6,3 mm - montagem. af_12/2015

Tipo	Cód. item	Desc. item	Unidade	Origem de preço	Coef.	Preço Unitário	Custo total (/kg)
insumo	39017	espacador / distanciador circular com entrada lateral, em plástico, para vergalhão #4,2 a 12,5* mm, cobrimento 20 mm	un	coef. de representatividade	1,333	R\$ 0,12	R\$ 0,15
insumo	43132	arame recozido 16 bwg, d = 1,65 mm (0,016 kg/m) ou 18 bwg, d = 1,25 mm (0,01 kg/m)	kg	coef. de representatividade	0,025	R\$ 25,15	R\$ 0,62
composição	88238	ajudante de armador com encargos complementares	h	coef. de representatividade	0,011	R\$ 18,86	R\$ 0,19
composição	88245	armador com encargos complementares	h	coef. de representatividade	0,065	R\$ 22,65	R\$ 1,46
composição	92801	corte e dobra de aço ca-50, diâmetro de 6,3 mm, utilizado em laje. af_12/2015	kg	coef. de representatividade	1,000	R\$ 11,30	R\$ 11,30

92725 - concretagem de vigas e lajes, fck=20 mpa, para lajes maciças ou nervuradas com uso de bomba em edificação com área média de lajes menor ou igual a 20 m² - lançamento, adensamento e acabamento. af_12/2015

Tipo	Cód. item	Desc. item	Unidade	Origem de preço	Coef.	Preço Unitário	Custo total (/m ²)
insumo	1524	concreto usinado bombeável, classe de resistência c20, com brita 0 e 1, slump = 100 +/- 20 mm, inclui serviço de bombeamento (nbr 8953)	m3	coef. de representatividade	1,103	R\$ 449,11	R\$ 495,36
composição	88262	carpinteiro de fôrmas com encargos complementares	h	coletado	0,094	R\$ 22,53	R\$ 2,11
composição	88309	pedreiro com encargos complementares	h	coletado	0,565	R\$ 22,79	R\$ 12,87
composição	88316	servente com encargos complementares	h	coletado	0,638	R\$ 18,84	R\$ 12,01
composição	90586	vibrador de imersão, diâmetro de ponteira 45mm, motor elétrico trifásico potência de 2 cv - chp diurno. af_06/2015	chp	coef. de representatividade	0,056	R\$ 1,14	R\$ 0,06
composição	90587	vibrador de imersão, diâmetro de ponteira 45mm, motor elétrico trifásico potência de 2 cv - chi diurno. af_06/2015	chi	coef. de representatividade	0,133	R\$ 0,35	R\$ 0,04

92452 - montagem e desmontagem de fôrma de viga, escoramento metálico, pé-direito simples, em chapa de madeira resinada, 2 utilizações. af_09/2020

Tipo	Cód. item	Desc. item	Unidade	Origem de preço	Coef.	Preço Unitário	Custo total (/m ²)
insumo	2692	desmoldante protetor para fôrmas de madeira, de base oleosa emulsificada em água	l	coef. de representatividade	0,010	R\$ 5,91	R\$ 0,05
insumo	4491	pontaletes #7,5 x 7,5* cm em pinus, mista ou equivalente da região - bruta	m	coef. de representatividade	0,726	R\$ 6,25	R\$ 4,53
insumo	10749	locação de escora metálica telescópica, com altura regulável de ~1,80" a ~3,20" m, com capacidade de carga de no mínimo 1000 kgf (10 kn), incluso tripe e ferragens	mes	coef. de representatividade	1,186	R\$ 11,45	R\$ 13,57
insumo	40275	locação de viga sanduíche metálica vazada para travamento de pilares, altura de #8* cm, largura de #6* cm e extensão de 2 m	mes	coef. de representatividade	0,356	R\$ 25,00	R\$ 8,90
insumo	40287	locação de barra de ancoragem de 0,80 a 1,20 m de extensão, com rosca de 5/8", incluindo porca e flange	mes	coef. de representatividade	0,474	R\$ 6,25	R\$ 2,96
insumo	40304	prego de aço polido com cabeça dupla 17 x 27 (2 1/2 x 11)	kg	coef. de representatividade	0,033	R\$ 25,59	R\$ 0,84
insumo	40339	locação de cruzeta para escora metálica	mes	coef. de representatividade	1,186	R\$ 6,25	R\$ 7,41
composição	88239	ajudante de carpinteiro com encargos complementares	h	coef. de representatividade	0,324	R\$ 18,79	R\$ 6,08
composição	88262	carpinteiro de fôrmas com encargos complementares	h	coletado	1,769	R\$ 22,53	R\$ 39,85
composição	92265	fabricação de fôrma para vigas, em chapa de madeira compensada resinada, e = 17 mm. af_09/2020	m2	coef. de representatividade	0,621	R\$ 149,00	R\$ 92,52

92760 - armação de pilar ou viga de uma estrutura convencional de concreto armado em um edifício de múltiplos pavimentos utilizando aço ca-50 de 6,3 mm - montagem. af_12/2015							
Tipo	Cód. item	Desc. item	Unidade	Origem de preço	Coef.	Preço Unitário	Custo total (/kg)
insumo	39017	espacador / distanciador circular com entrada lateral, em plástico, para vergalhão #4,2 a 12,5* mm, cobrimento 20 mm	un	coef. de representatividade	0,970	R\$ 0,12	R\$ 0,11
insumo	43132	arame recozido 16 bwg, d = 1,65 mm (0,016 kg/m) ou 18 bwg, d = 1,25 mm (0,01 kg/m)	kg	coef. de representatividade	0,025	R\$ 25,15	R\$ 0,62
composição	88238	ajudante de armador com encargos complementares	h	coef. de representatividade	0,016	R\$ 18,86	R\$ 0,29
composição	88245	armador com encargos complementares	h	coef. de representatividade	0,095	R\$ 22,65	R\$ 2,14
composição	92792	corte e dobra de aço ca-50, diâmetro de 6,3 mm, utilizado em estruturas diversas, exceto lajes. af_12/2015	kg	coef. de representatividade	1,000	R\$ 11,58	R\$ 11,58
92415 - montagem e desmontagem de fôrma de pilares retangulares e estruturas similares, pé-direito simples, em chapa de madeira compensada resinada, 2 utilizações. af_09/2020							
Tipo	Cód. item	Desc. item	Unidade	Origem de preço	Coef.	Preço Unitário	Custo total (/m²)
insumo	2692	desmoldante protetor para fôrmas de madeira, de base oleosa emulsionada em água	l	coef. de representatividade	0,010	R\$ 5,91	R\$ 0,05
insumo	40271	locacao de aprumador metálico de pilar, com altura e ângulo reguláveis, extensão de *1,50* a *2,80* m	mes	coef. de representatividade	0,196	R\$ 16,25	R\$ 3,18
insumo	40275	locacao de viga sanduíche metálica vazada para travamento de pilares, altura de *8* cm, largura de *6* cm e extensão de 2 m	mes	coef. de representatividade	0,393	R\$ 25,00	R\$ 9,82
insumo	40287	locacao de barra de ancoragem de 0,80 a 1,20 m de extensão, com rosca de 5/8", incluindo porca e flange	mes	coef. de representatividade	0,785	R\$ 6,25	R\$ 4,90
insumo	40304	prego de aço polido com cabeça dupla 17 x 27 (2 1/2 x 11)	kg	coef. de representatividade	0,019	R\$ 25,59	R\$ 0,48
composição	88239	ajudante de carpinteiro com encargos complementares	h	coef. de representatividade	0,206	R\$ 18,79	R\$ 3,87
composição	88262	carpinteiro de fôrmas com encargos complementares	h	coletado	1,125	R\$ 22,53	R\$ 25,34
composição	92263	fabricação de fôrma para pilares e estruturas similares, em chapa de madeira compensada resinada, e = 17 mm. af_09/2020	m2	coef. de representatividade	0,525	R\$ 192,02	R\$ 100,81
92720 - concretagem de pilares, fck = 25 mpa, com uso de bomba em edificação com seção média de pilares menor ou igual a 0,25 m² - lançamento, adensamento e acabamento. af_12/2015							
Tipo	Cód. item	Desc. item	Unidade	Origem de preço	Coef.	Preço Unitário	Custo total (/m³)
insumo	1527	concreto usinado bombeável, classe de resistência c25, com brita 0 e 1, slump = 100 +/- 20 mm, inclui serviço de bombeamento (nbr 8953)	m3	coef. de representatividade	1,103	R\$ 463,37	R\$ 511,09
composição	88262	carpinteiro de fôrmas com encargos complementares	h	coletado	0,199	R\$ 22,53	R\$ 4,48
composição	88309	pedreiro com encargos complementares	h	coletado	0,199	R\$ 22,79	R\$ 4,53
composição	88316	servente com encargos complementares	h	coletado	1,192	R\$ 18,84	R\$ 22,45
composição	90586	vibrador de imersão, diâmetro de ponteira 45mm, motor elétrico trifásico potência de 2 cv - chp diurno. af_06/2015	chp	coef. de representatividade	0,068	R\$ 1,14	R\$ 0,07
composição	90587	vibrador de imersão, diâmetro de ponteira 45mm, motor elétrico trifásico potência de 2 cv - chi diurno. af_06/2015	chi	coef. de representatividade	0,131	R\$ 0,35	R\$ 0,04