

Juliana Melo de Paulo
Marcos Akira Ishiyama
Tiago Fernandes Moherdaui
Yasmeen Hwan de Morais

**PROJETO DE ESTRUTURA CONVENCIONAL DE EDIFÍCIO E ALTERNATIVA
PARA OTIMIZAÇÃO**

São Paulo
2016

Juliana Melo de Paulo
Marcos Akira Ishiyama
Tiago Fernandes Moherdaui
Yasmeen Hwan de Moraes

**PROJETO DE ESTRUTURA CONVENCIONAL DE EDIFÍCIO E ALTERNATIVA
PARA OTIMIZAÇÃO**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do Diploma de Engenheiro Civil

Orientação: Prof. Januário Pellegrino Neto

São Paulo
2016

Catálogo-na-publicação

Paulo, Juliana

Projeto de estrutura convencional de edifício e alternativa para otimização /
J. Paulo, M. Ishiyama, T. Moherdau, Y. Moraes -- São Paulo,
2016. 93 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1. ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO 2. LAJES 3. EDIFÍCIOS
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Estruturas e Geotécnica II. t. III. Ishiyama, Marcos
IV. Moherdau, Tiago V. Moraes, Yasmeen

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer imensamente às nossas famílias, por nos terem incentivado e apoiado durante a trajetória para esta conquista.

Aos nossos amigos por terem nos acompanhado por todo esse período e o tornado mais agradável.

A todos os professores que nos deram as vias para chegar aonde chegamos, nos deram todo o apoio necessário para nos formarmos engenheiros, especialmente ao nosso orientador, Professor Januário Pellegrino Neto.

Gostaríamos de agradecer à USP, à Escola Politécnica, e seus funcionários por ter nos dado todo o suporte e infra-estrutura necessários para o acompanhamento do curso. E por ter nos proporcionado oportunidades como os intercâmbios e o Programa de Dupla-Formação Poli-FAU, que expandiram nossos horizontes.

Agradecemos também à TQS Informática Ltda pelo fornecimento do software CAD/TQS e ao Luiz Felipe Sakata pelo fornecimento do projeto arquitetônico.

Finalmente, gostaríamos de agradecer ao grupo, por todo o esforço e dedicação.

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo conceber e estudar, a partir do projeto arquitetônico de um edifício residencial localizado na cidade de São Paulo, duas alternativas de estruturas que atendam às necessidades do projeto, comparando-as. Para atingir este propósito, primeiramente foi criada uma metodologia, a qual foi seguida ao longo de todo o trabalho como forma de uniformizar e padronizar as análises. Trata-se da iteração das seguintes etapas: 1) escolha de uma arquitetura; 2) concepção de uma estrutura que a atenda; 3) modelagem estrutural no software CAD/TQS; 4) verificação dos requisitos de desempenho e garantia de conformidade; 5) análise de performance, de custo e de quantidade de trabalho, a partir dos quantitativos obtidos no software. A ideia foi definir uma metodologia para orientar a comparação entre soluções estruturais. Quanto às estruturas, foi decidido estudar primeiramente a que chamaremos de “convencional”, composta por lajes, vigas e pilares em concreto armado e moldados in loco, e, posteriormente, outra que chamamos de “alternativa”, utilizando o sistema de lajes nervuradas associadas a vigas e pilares moldados in loco. Esta veio como resposta à tentativa de otimização da Solução Convencional, na busca de reduzir o custo da obra, mantendo, ou possivelmente melhorando, seu desempenho. Procurou-se obter, ao final do trabalho, uma base comparativa sólida, a qual levou à confirmação de que, ainda com algumas simplificações, a metodologia adotada obteve bons resultados, ou seja, de que foi encontrada uma solução estrutural que se adequasse melhor ao projeto proposto, na maior parte dos aspectos, atendendo ao desempenho estrutural. O resultado deste estudo pode ser utilizado para provar a necessidade de interação entre as diferentes áreas envolvidas na realização de um projeto, como a arquitetura e a engenharia estrutural, ao longo de todas as suas etapas, e a necessidade de se racionalizar a escolha de uma solução estrutural, uma vez que podem haver outras que atendem melhor especificamente àquele projeto do que aquela à qual culturalmente se está acostumado a adotar.

Palavras-Chave: Projeto Estrutural. Estrutura de Concreto Armado. Estrutura Convencional. Laje Maciça. Laje Nervurada.

ABSTRACT

The present study aims to design and analyse, through a pre-established architectural design of a residential building located in the city of São Paulo, two structural alternatives that meet the needs of the project, aiming to compare them. For this purpose, the group first created a methodology, which was used to guide the entire study, as a way to standardize the whole analysis. The following steps describe it: 1) choose an architectural project; 2) conceive its structural solution; 3) design a structural model with the software CAD/TQS; 4) verify its performance and its compliance with normative requirements; 5) estimate its costs, labour and performance. The idea was to define a methodology in order to provide guidance as to compare structural solutions. Regarding these structural solutions, we first studied the "conventional" one, consisted by a slab-beam-pillar system in reinforced concrete and cast-in-place and after, the one we called the "alternative" one, which consists of ribbed slabs with pillars and beams made of reinforced cast-in-place concrete. This came as a response to the attempt of optimizing the Conventional Solution, in the quest to reduce the cost of labour while maintaining, or even improving its performance. At the end of the study, we obtained a solid comparative basis, validating the hypothesis that, even with some simplifications, the adopted methodology has achieved a solid result, that is, that a structural solution that was better suited to the proposed project was identified. This study shows that a higher level of interaction between all parts involved in the design of a building, e.g. architects and engineers, would be most beneficial if adopted along all stages of the designing process (i.e. especially to early stages of the conception), providing means to consider solutions other than the ones we regionally tend to adopt, and thus reaching a more optimized project overall.

Keywords: Structural Design. Reinforced Concrete Structure. Conventional Structure. Flat Slab. Ribbed Slab.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Metodologia utilizada para desenvolvimento do estudo	21
Figura 2 – Implantação e entorno do objeto de estudo.	23
Figura 3 – Planta do Abrigo. (Térreo + 1)	24
Figura 4 - Planta do PT6 (Térreo + 7).	25
Figura 5 – Indicação esquemática dos espaços e apartamentos-tipo da arquitetura proposta.	26
Figura 6 - Modelo tridimensional digital no SketchUp	27
Figura 7 - Modelo em corte no PT6 (Térreo + 7)	28
Figura 8 - Perspectiva renderizada do modelo tridimensional.....	28
Figura 9 - Principais elementos estruturais a serem concebidos (ALVA, 2007)	29
Figura 10 - Dimensões consideradas na laje maciça (BASTOS, 2015)	31
Figura 11 – Lançamento da estrutura do pavimento PT5 no CAD/TQS.....	35
Figura 12 - Isopleta de velocidade básica do vento, V0 (NBR6123)	39
Figura 13 – Concreto classe C40 no Abrigo e Biblioteca	42
Figura 14 - Concreto classe C35 no pavimento PT9.....	42
Figura 15 – Concreto classe C30 para os demais pavimentos	43
Figura 16 – Trecho em planta do pavimento PT9 na Solução Convencional	43
Figura 17 – Pavimento Biblioteca da Solução Convencional com as vigas V14 e V23 de menor comprimento e maior altura	44
Figura 18 - Pavimento Abrigo da Solução Convencional com as vigas V26 e V32 de menor comprimento	44
Figura 19 – Região do modelo estrutural da Solução Convencional com vigas em balanço de comprimento menor e altura maior	45
Figura 20 - Pavimento Abrigo da Solução Convencional com as vigas V5 e V55 com maiores seções transversais.....	45
Figura 21 - Região do modelo estrutural da Solução Convencional com vigas em balanço de maior seção transversal.....	46
Figura 22 - Pavimento PT1 da Solução Convencional com vigas de borda de menor seção e lajes de menor espessuras.....	47
Figura 23 - Pavimento PT1 da Solução Convencional com adição dos pilares P36 e P37.....	47
Figura 24 - Região do modelo estrutural da Solução Convencional com a adição de pilares.....	48
Figura 25 - Modelo estrutural da Solução Convencional.....	49
Figura 26 - Desenho de fôrmas do pavimento PT5 da Solução Convencional	50
Figura 27 - Desenho de fôrmas do pavimento Biblioteca da Solução Convencional	51
Figura 28 - Armaduras verticais negativas nas lajes L10, L11 e L12 do pavimento Biblioteca da Solução Convencional	52
Figura 29 - Armaduras da viga V12 do pavimento Biblioteca da Solução Convencional	53
Figura 30 - Armaduras do pilar P37 da Solução Convencional.....	54
Figura 31 – Aspecto geral da abertura de fissuras no pavimento PT1 da Solução Convencional	56
Figura 32 - Ampliação da abertura de fissuras no pavimento PT1 da Solução Convencional com abertura máxima de 0,18 mm	56
Figura 33 - Ampliação da abertura de fissuras no pavimento PT1 da Solução Convencional com abertura máxima de 0,29 mm	56
Figura 34 - Seção transversal de lajes nervuradas (ALBUQUERQUE, 1999)	59

Figura 35 – Catálogo de dados técnicos da Atex	61
Figura 36 - Pavimento Abrigo, da Solução com Laje Nervurada, com vigas em balanço de menor comprimento	62
Figura 37 - Pavimento PT1, da Solução com Laje Nervurada, com as vigas em balanço de menor comprimento	62
Figura 38 - Região do modelo estrutural, da Solução com Laje Nervurada, com vigas em balanço de menor comprimento	63
Figura 39 - Pavimento Abrigo, da Solução com Laje Nervurada, com novas vigas em balanço.....	63
Figura 40 - Pavimento PT1, da Solução com Laje Nervurada, com nova viga em balanço.....	64
Figura 41 - Região do modelo estrutural, da Solução com Laje Nervurada, onde foram introduzidas novas vigas em balanço	64
Figura 42 - Região do Pilar P6 da Solução com Laje Nervurada	65
Figura 43 - Região próxima ao Pilar P6 no modelo estrutural da Solução com Laje Nervurada	65
Figura 44 - Modelo estrutural da Solução com Laje Nervurada em perspectiva inferior	66
Figura 45 – Desenho de fôrmas com cubetas do Pavimento PT5 da Solução com Laje Nervurada.....	66
Figura 46 - Desenho de fôrmas com cubetas do pavimento Biblioteca da Solução com Laje Nervurada	67
Figura 47 - Armaduras verticais negativas nas lajes L10, L11 e L12 do pavimento Biblioteca da Solução com Laje Nervurada.....	68
Figura 48 - armaduras da viga V12 do pavimento Biblioteca da Solução com Laje Nervurada	68
Figura 49 - Abertura de fissuras no pavimento PT1 na Solução de Laje Nervurada.	70
Figura 50 - Ampliação da abertura de fissuras no pavimento PT1 da Solução de Laje Nervurada com abertura máxima de 0,27 mm	70
Figura 51 - Ampliação da abertura de fissuras no pavimento PT1 da Solução de Laje Nervurada com abertura máxima de 0,28 mm	71
Figura 52 - Metodologia utilizada para análise do desempenho	73
Figura 53 - Comparação das soluções.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental (NBR6118)	32
Tabela 2 - Correpondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$	33
Tabela 3 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental	33
Tabela 4 - Dimensões mínimas para lajes apoiadas em vigas (NBR 15200:2004)...	34
Tabela 5 - Pré-dimensionamento das lajes do sétimo pavimento (PT5)	36
Tabela 6 - Pré-Dimensionamento das vigas do sétimo pavimento (PT5).....	37
Tabela 7 – Pré-Dimensionamento dos pilares do sétimo pavimento (PT5).....	37
Tabela 8 - Fator S2 (NBR6123).....	40
Tabela 9 - Fator S3 (NBR6123).....	41
Tabela 10 - Referente à situação de flecha máxima, para a solução de laje maciça	55
Tabela 11 - Tabela de Quantitativos para a Solução Convencional.....	57
Tabela 12 - Tabela de taxas de consumo da estrutura para a Solução Convencional	58
Tabela 13 – Valores obtidos no pré-dimensionamento da Laje Nervurada.....	60
Tabela 14 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas biapoiadas (NBR15200:2004)	61
Tabela 15 - Tabela referente à situação de flecha máxima, para a solução de Laje Nervurada	69
Tabela 16 - Tabelas de Quantitativos para a solução com Laje Nervurada	71
Tabela 17 - Tabela de taxas de consumo da estrutura para a solução com Laje Nervurada	72
Tabela 18 - Tabelas referentes às situações de flecha máxima, para as duas soluções.....	76
Tabela 19 - Custos Unitários Básicos (SINDUSCON-SP, 2016).....	80
Tabela 20 - Custos Unitários PINI de Edificações (PINI, 2016).....	81
Tabela 21 – Quadro resumo de áreas do projeto arquitetônico obtido a partir do software AutoCAD.....	81
Tabela 22 - Custos totais da obra baseados em índices PINI e SindusCon	82
Tabela 23 - Cotação de preços de materiais (PINI, 2016)	83
Tabela 24 - Custos com material para a Solução Convencional segundo preços PINI	84
Tabela 25 - Sistemas de fôrmas para Solução Convencional.....	84
Tabela 26 - Orçamento de materiais da solução em Laje Nervurada	85
Tabela 27 - Sistemas de fôrmas para a solução em Laje Nervurada.....	85
Tabela 28 - Composição da quantidade de trabalho para Solução Convencional	87
Tabela 29 - Composição da quantidade de trabalho para solução em Laje Nervurada	88

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Pré-Dimensionamento de espessura de laje	35
Equação 2 - Altura útil da laje.....	35
Equação 3 - Pré-Dimensionamento de altura de viga	36
Equação 4 - Pré-Dimensionamento da área da seção do pilar	37
Equação 5 - Velocidade característica do vento	39
Equação 6 - Pressão dinâmica.....	39
Equação 7 - Altura da nervura.....	60
Equação 8 - Largura da nervura.....	60
Equação 9 - Vão efetivo da laje.....	60

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
1.1	Motivação	19
1.2	Objetivo	20
1.3	Método de Pesquisa	20
1.4	Metodologia.....	21
1.5	Objeto de Estudo	22
1.5.1	Arquitetura.....	23
2.	SISTEMA ESTRUTURAL.....	29
2.1	Solução Convencional	31
2.1.1	Revisão Bibliográfica	31
2.1.2	Modelo	34
2.1.2.1	Pré-Dimensionamento e Concepção Estrutural Inicial.....	34
2.1.2.2	Carregamentos.....	37
2.1.2.3	Processamento e Estrutura Final	41
2.1.2.4	Armaduras	51
2.1.3	Atendimento ao Desempenho	54
2.1.4	Quantitativos	57
2.2	Solução de Laje Nervurada.....	58
2.2.1	Revisão Bibliográfica	58
2.2.2	Modelo	59
2.2.2.1	Pré-dimensionamento e Concepção Inicial	59
2.2.2.2	Carregamentos.....	61
2.2.2.3	Processamento e Estrutura Final	61
2.2.2.4	Armaduras	67
2.2.3	Atendimento ao Desempenho	69
2.2.4	Quantitativos	71
2.3	Comparação de Desempenho.....	72
3.	CUSTOS.....	78

3.1	Revisão Bibliográfica	78
3.1.1	Estimativa	79
3.1.2	Orçamento	82
3.2	Solução Convencional	83
3.3	Solução de Laje Nervurada	84
4.	QUANTIDADE DE TRABALHO	86
4.1	Revisão Bibliográfica	86
4.2	Solução Convencional	87
4.3	Solução com Laje Nervurada	88
4.4	Comparação de Quantidade de Trabalho	88
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
5.1	Comentários	89
5.2	Conclusões	90
5.3	Sugestões para Trabalhos Futuros	91
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

1. Introdução

As primeiras estruturas concebidas em concreto armado utilizavam soluções com lajes maciças moldadas in loco para vencer vãos relativamente pequenos, da ordem de quatro metros. Agiam como fatores limitantes: a resistência do concreto, a falta de recursos tecnológicos e inúmeras hipóteses simplificadoras para a modelagem estrutural, além da falta de conhecimento sobre o comportamento do próprio sistema estrutural. Assim, com as mudanças nas demandas da arquitetura, ocorridas de acordo com as necessidades da sociedade, estas soluções passaram a ser menos utilizadas e foram desenvolvidas formas de contornar tais restrições, como a melhoria no desempenho de materiais e inovações em métodos construtivos.

Apesar disso, ainda há, atualmente no Brasil, um grande índice de utilização de soluções estruturais, ditas convencionais, em concreto armado. Isso, devido a um conjunto de fatores, como a flexibilidade do projeto, a disponibilidade de mão-de-obra barata e a própria cultura de simplicidade estrutural do país.

Contudo, a crise brasileira atual evidencia cada vez mais a importância de se valorizar aspectos como durabilidade, alta produtividade, menores custos e melhor qualidade, existindo uma tendência de padronização de seções e materiais aliada ao estudo de alternativas específicas, em busca da otimização dos processos construtivos.

A chave para se alcançar estes objetivos se inicia na concepção de um projeto estrutural otimizado e racionalizado, cujas etapas de concepção devem considerar diversos aspectos, como a fidelidade à arquitetura e às funções impostas por ela, o desempenho quanto aos Estados Limites Último e de Serviço, os aspectos econômicos e a viabilidade de execução.

1.1 Motivação

A motivação do trabalho está, em primeiro lugar, no desejo de mostrar a importância de um projeto bem elaborado, concebido por meio do diálogo entre a arquitetura e a engenharia. Sabe-se que as boas escolhas de um projeto, em seu início, trazem chances muito maiores de sucesso do que a tentativa de corrigir posteriormente escolhas malfeitas. Por isso, acredita-se que cada etapa deva ser discutida pelas partes envolvidas, de forma a haver um equilíbrio e, por exemplo, a arquitetura não ser prejudicada pelo fato de, ao longo do projeto, ter se optado por redução de custos.

Em segundo lugar, a motivação está no interesse em vivenciar todas as etapas de um projeto estrutural, desenvolvendo um maior aprofundamento nesta área da engenharia civil. Uma vez que, dentro da faculdade, o conhecimento é desmembrado em diversas partes, para que se possa assimilar cada uma mais profundamente, falta uma vivência do problema por completo, isto é, da concepção de um projeto estrutural de edifícios em concreto como um todo. Desta forma, é possível experienciar as inúmeras tomadas de decisão envolvidas na escolha de um sistema estrutural, verificando seu desempenho, ponderando custos, quantidade de trabalho e atendimento ao projeto arquitetônico, além dos desafios de dimensionamentos que um projeto pode apresentar.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é buscar uma solução estrutural otimizada para um edifício com arquitetura previamente estabelecida, por meio de uma metodologia baseada na interação entre as diversas áreas do projeto, como as de desempenho, custo e quantidade de trabalho. Busca-se, dessa forma, provar que no processo de concepção de uma estrutura e elaboração de um projeto, a relação iterativa entre as áreas supera a relação linear e unidirecional, usualmente adotada na prática, levando, no limite, à otimização do projeto. Pretende-se provar ainda, que uma solução deve ser específica para um problema e que saindo da inércia das soluções estruturais convencionais, enraizadas na cultura da engenharia civil brasileira, pode-se obter melhores resultados.

1.3 Método de Pesquisa

O método de pesquisa utilizado no presente trabalho pode ser assim descrito:

- Tipo de pesquisa: a pesquisa será realizada por meio de estudo de bibliografia pertinente ao tema, além de consulta a professores experientes na área, para que sejam possíveis a escolha adequada das estruturas a serem estudadas e as análises de diferentes soluções, bem como a modelagem das estruturas utilizando o software CAD/TQS e seu dimensionamento.
- Dados a serem obtidos: com a modelagem do edifício, a pesquisa visa realizar o dimensionamento de lajes, vigas e pilares e seus respectivos detalhamentos, assim como seus subseqüentes dados de consumo de materiais e de desempenho do edifício para cada estrutura concebida.
- Forma de obtenção dos dados: os dados serão obtidos por meio de softwares computacionais gráficos e normas técnicas que abordem engenharia de estruturas e inovações na construção civil.
- Tratamento e análise dos dados: a partir dos relatórios de consumo, desempenho em serviço, e dimensões finais dos elementos estruturais, busca-se analisar as informações quantitativas e qualitativas, segundo premissas previamente estabelecidas, embasadas em dados extraídos de pesquisas complementares, em normas, revistas e livros.
- Limitações ao objetivo: o estudo é realizado pelo uso de um software para a simulação do comportamento da estrutura, passivo de limitações e complicações, as quais impedem o aproveitamento completo de dados; análise de número limitado de configurações estruturais como base de comparação entre elas.

1.4 Metodologia

A metodologia aqui apresentada foi desenvolvida com o objetivo de mostrar que um projeto, como um sistema, deve ter todas as suas atividades inter-relacionadas por meio de uma sequência lógica, estabelecendo, assim, uma dependência direta ou indireta de cada atividade em relação às demais.

Para fins de desenvolvimento deste trabalho, foram selecionadas as áreas mais significativas envolvidas na concepção do projeto de um edifício, a fim de se atingir uma solução ótima. São estas: a arquitetura, a engenharia estrutural, o desempenho, o custo, e a quantidade de trabalho demandada.

Nestes termos, os objetos de estudo serão a análise e reestruturação de um projeto arquitetônico (arquitetura) e a concepção de sua respectiva estrutura (engenharia estrutural), bem como o atendimento ao desempenho em serviço, condicionante para o seguimento das demais etapas. Enquanto as demais áreas (desempenho estrutural, custo e quantidade de trabalho), por sua vez, serão tratadas como critérios de análise.

Articulando-as como um processo sistêmico, a metodologia desenvolvida pode ser resumida no esquema presente na Figura 1 abaixo:

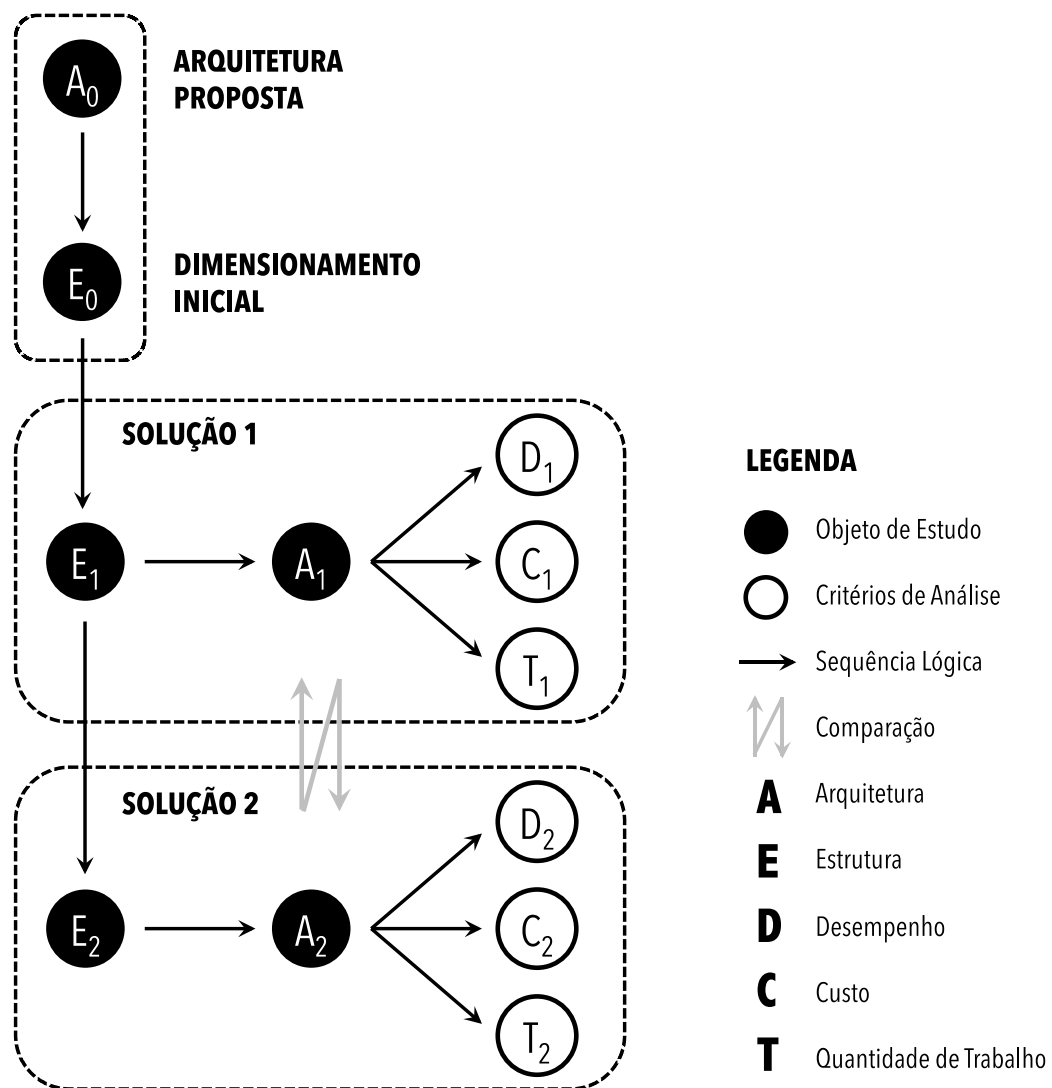


Figura 1 - Metodologia utilizada para desenvolvimento do estudo

Sequência demonstrada no esquema:

- Desenvolver um projeto arquitetônico (A_0);
- Conceber e dimensionar uma solução estrutural inicial (E_0);
- Partir para o estudo da solução 1:
 - Propor uma nova solução estrutural convencional (E_1), através da análise do desempenho de E_0 e de alterações no projeto até que aquele seja atendido;
 - Remodelar a respectiva arquitetura (A_1), caso a etapa anterior implique em alterações;
 - Analisar custo (C_1), desempenho (D_1) e quantidade de trabalho (T_1);
 - Concluir analiticamente quais destes parâmetros devem ser melhorados.
- Partir para o estudo da solução 2:
 - Propor uma solução alternativa de estrutura (E_2);
 - Remodelar a respectiva arquitetura (A_2), caso a etapa anterior implique em alterações;
 - Analisar custo (C_2), desempenho (D_2) e quantidade de trabalho (T_2);
- Comparar os resultados obtidos nas análises das soluções 1 e 2, concluindo se foi realmente possível encontrar uma solução mais adequada para a arquitetura escolhida.

1.5 Objeto de Estudo

Para concretizar a idealização do trabalho, fez-se necessária a escolha de um objeto de estudo, no caso, um projeto arquitetônico básico, a partir do qual fosse possível iniciar a concepção estrutural. Para tanto, buscou-se orientar a escolha por uma arquitetura que não fosse nem tão complexa a ponto de sua complexidade trazer dificuldades adicionais na elaboração da concepção e no cálculo estrutural, ofuscando o intuito do estudo, nem demasiadamente simples, conseguindo trazer particularidades que inspirassem diferentes soluções alternativas.

Definiu-se, então, que a arquitetura seria escolhida dentre os produtos finais das disciplinas AUP0158 - Arquitetura: Projeto 2 (edifícios habitacionais) e AUP0162

- Arquitetura: Projeto 4 (equipamentos públicos). Ambas são ministradas na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU-USP), e têm seus projetos compilados em um caderno único. Os produtos destas disciplinas foram edifícios com local e características arquitetônicas bem definidas, sem um grande aprofundamento com relação à concepção de estruturas (como seria o caso da maioria dos projetos já executados), e com algumas liberdades por parte do projetista, uma vez que se trata de um trabalho em âmbito acadêmico de graduação.

Após a leitura e análise da publicação que consolida o produto final das disciplinas acima mencionadas, optou-se pelo projeto que melhor atendia aos objetivos deste trabalho, o do aluno Luiz Felipe Sakata. Este, por sua vez, concordou em prestar auxílio para as decisões a serem tomadas, que poderiam ocasionalmente, contrariar o intuito da arquitetura proposta.

1.5.1 Arquitetura

O projeto escolhido como base do trabalho tem vinculado a si uma localização proposta. A edificação seria implantada na esquina da R. Gravataí com a R. Caio Prado, no trecho entre a R. Augusta e R. da Consolação, representada na Figura 2:



Figura 2 – Implantação e entorno do objeto de estudo.

Esta localidade possui algumas particularidades que serão relevantes para o trabalho, como:

- Restrição de ruído: por estar localizado em um centro urbano, especialmente em zona central, possíveis restrições ao barulho da obra podem ser importantes para descartar algumas ações de demasiado impacto sonoro. É possível ainda que alguns equipamentos utilizados na obra tenham que ter

sua utilização restrita a horários específicos para se adequar às normas de ruído da vizinhança.

- Trafegabilidade de caminhões: a região encontra-se no interior da ZMRC - Zona de Máxima Restrição à Circulação de caminhões, portanto, a circulação é restrita aos horários noturnos (entre 21h e 5h) durante a semana, às tardes de sábado e aos domingos

O edifício proposto segue alguns princípios, sendo parte destes atrelados aos temas tratados durante a disciplina em que foi formulado e outros resultantes do partido arquitetônico adotado pelo arquiteto. São estes:

- Térreo público, fachada ativa e diálogo com o entorno. A ideia é de que o edifício não deve ser algo fechado em si, mas aberto ao público e à cidade, o que se reflete na composição do térreo, disposta a seguir:
 - Praça fazendo frente ao Parque Augusta, e de certo modo convidando a uma continuidade com ele (cuja permanência ainda se encontra, no momento, como objeto de disputas legais);
 - Biblioteca, atribuindo um equipamento de uso público ao local e a característica de uso misto ao edifício;
 - Café, tornando-se um local de encontro e ganhando assim a movimentação da cidade um pouco para dentro do edifício.
 - Primeiro andar constituído unicamente por um abrigo com capacidade para 20 crianças, cuja planta é apresentada na Figura 3.

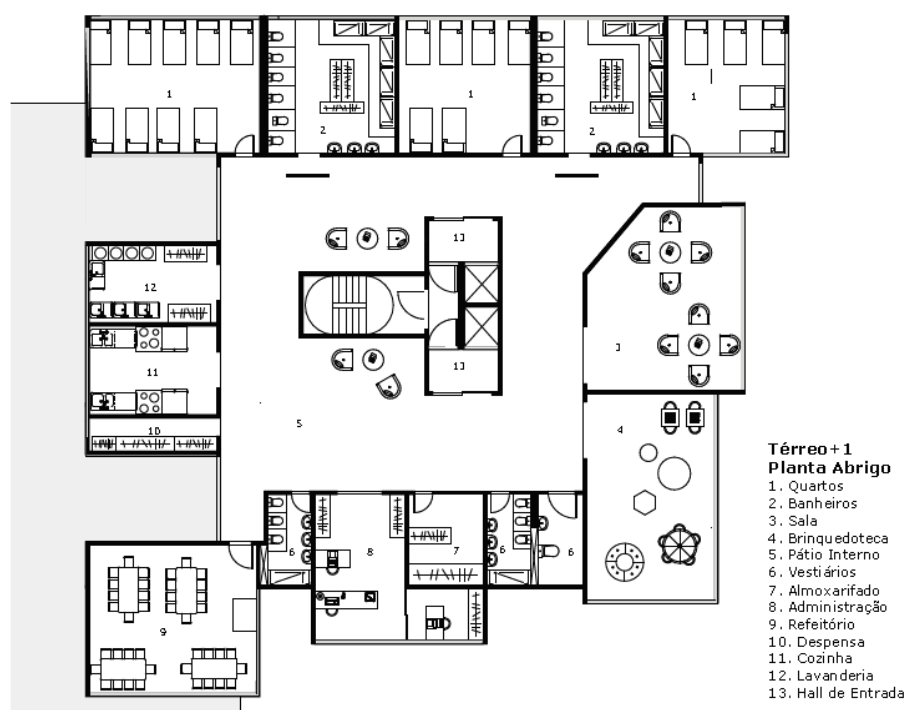


Figura 3 – Planta do Abrigo. (Térreo + 1)

Diversidade de unidades: este princípio é observado por meio da existência de 5 tipologias diferentes (3 quartos, 2 quartos, 1 quarto, estúdio e quitinete). Com as variações dadas pela presença ou não de extensão fechada do apartamento ou varandas, chegam a formar 14 unidades-tipo residenciais diferentes. Um exemplo desta variedade pode ser visto na Figura 4.

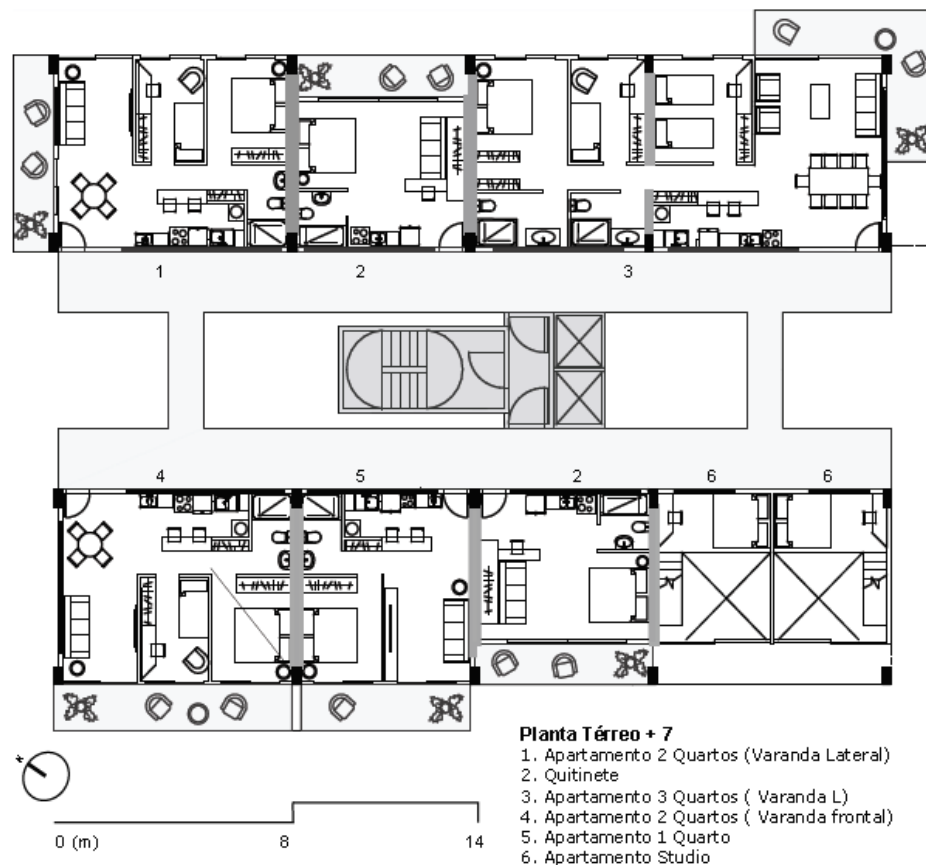


Figura 4 - Planta do PT6 (Térreo + 7).

- Modularidade: as diferentes unidades-tipo seguem as dimensões impostas pelos vãos entre pilares, que possuem dois tamanhos diferentes. Desta maneira, as unidades podem ser permutadas respeitando a localização definida por suas dimensões. A localização final de cada unidade pode ser representada pela perspectiva esquemática colorida apresentada na Figura 5.

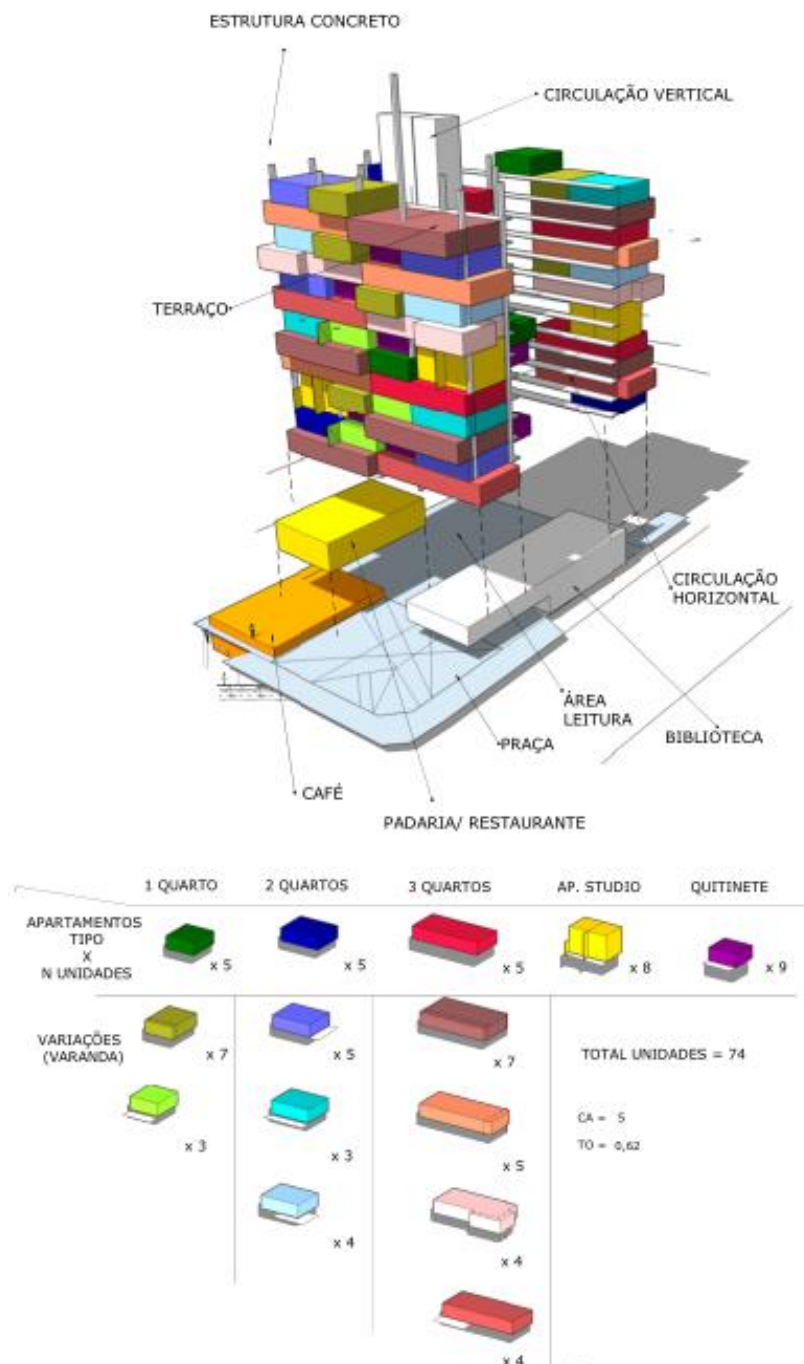


Figura 5 – Indicação esquemática dos espaços e apartamentos-tipo da arquitetura proposta.

A maneira como o projeto foi concebido já serve como orientação para a concepção da estrutura. As unidades residenciais são distribuídas em duas torres suportadas por 10 pilares cada, totalizando 20 pilares (previstos inicialmente com uma seção de 30 x 60 cm). As duas torres são ligadas por passarelas que compõem o sistema de circulação horizontal, funcionando como diafragma para transmissão de esforços horizontais, em conjunto com a caixa de escadas e de elevadores (circulação vertical), que constituem também o núcleo de rigidez da estrutura.

Inicialmente, no projeto arquitetônico não havia indicações de vigas, o que, segundo o idealizador, não significa uma opção por estruturas sem estas, sendo apenas uma parte do projeto que não chegou a ser definida. Há diversas paredes

que abrigariam muito bem vigas ligando os pilares. A única interferência que surgiria seria no caso de unidades com extensão em L, onde ocorreriam vigas cruzando ambientes, no caso de uma solução de vigas sempre entre pilares, como seria uma proposta simplificada da Solução Convencionalmente empregada para estruturas reticuladas.

O projeto também não inclui uma proposta bem definida dos sistemas prediais. No entanto, nota-se uma preocupação por parte do arquiteto de aproximar todas as áreas molhadas da fachada interna das duas torres, onde há a circulação horizontal. Por conta disso, não houve priorização em se definir interferência destes sistemas com a estrutura.

Assim, pode-se concluir que o projeto escolhido para compor a base arquitetônica para este trabalho atende às características de complexidade e simplicidade propostas inicialmente. O sistema reticulado indutível das localizações dos pilares representa uma fonte de simplicidade, enquanto as diferentes disposições de unidades e geometrias das lajes trazem, junto aos vãos relativamente grandes, complexidade, de maneira a provocar a valorização de soluções alternativas eficientes para serem estudadas na segunda etapa deste trabalho.

O projeto foi fornecido por meio de um modelo tridimensional digital desenvolvido no software SketchUp, podemos ver nas figuras abaixo (Figura 6, Figura 7 e Figura 8) o modelo fornecido, um corte por meio do próprio programa e uma renderização fornecida pelo arquiteto.

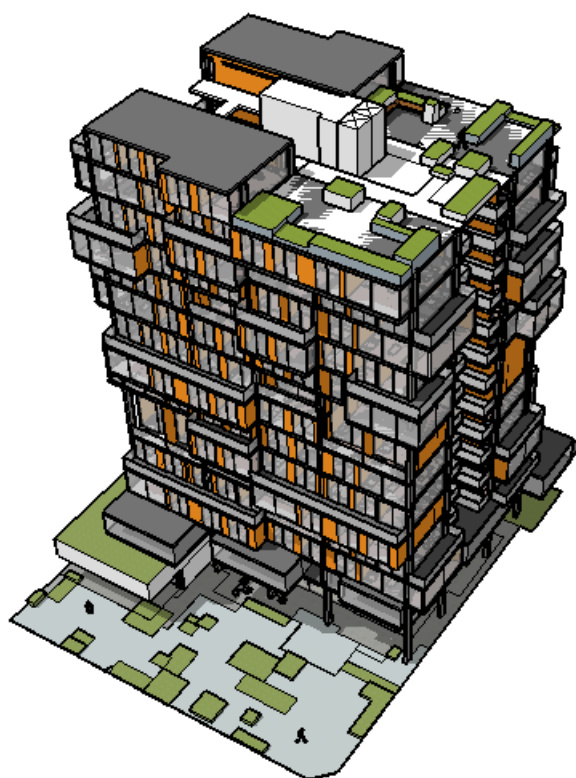


Figura 6 - Modelo tridimensional digital no SketchUp

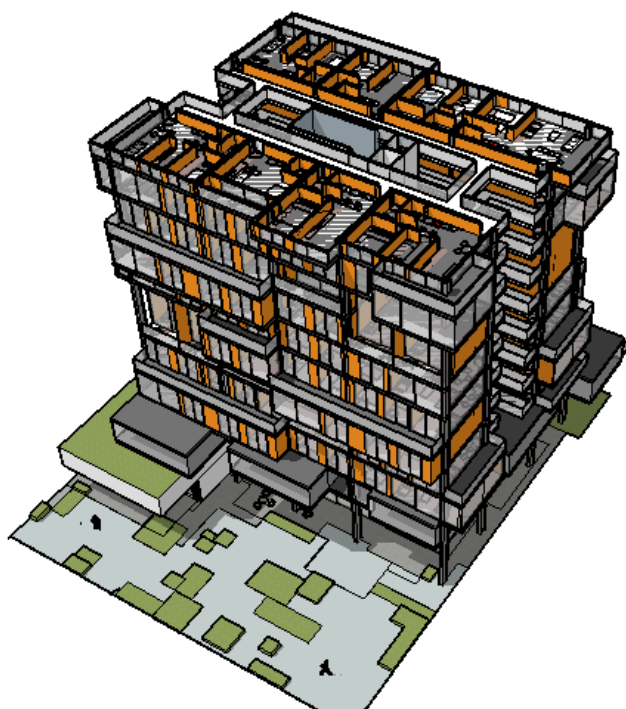


Figura 7 - Modelo em corte no PT6 (Térreo + 7)



Figura 8 - Perspectiva renderizada do modelo tridimensional

2. Sistema Estrutural

A primeira etapa de um projeto de estruturas é a concepção estrutural. Nesta fase, busca-se integrar a segurança (principalmente a ruína de elementos e deslocamentos excessivos), funcionalidade (atender da melhor forma às interferências criadas pelos projetos de arquitetura e outras disciplinas) e redução de custos (tornando o projeto, de fato, economicamente viável).

A concepção consiste basicamente em escolher os materiais que melhor atendam a função de parte resistente da estrutura, a existência e localização de vigas e pilares e definição de dimensões preliminares dos diversos elementos estruturais (ARAÚJO, 2014; PINHEIRO, MUZARDO, SANTOS, 2003). A Figura 9 apresenta os diversos elementos estruturais que precisam ser concebidos.

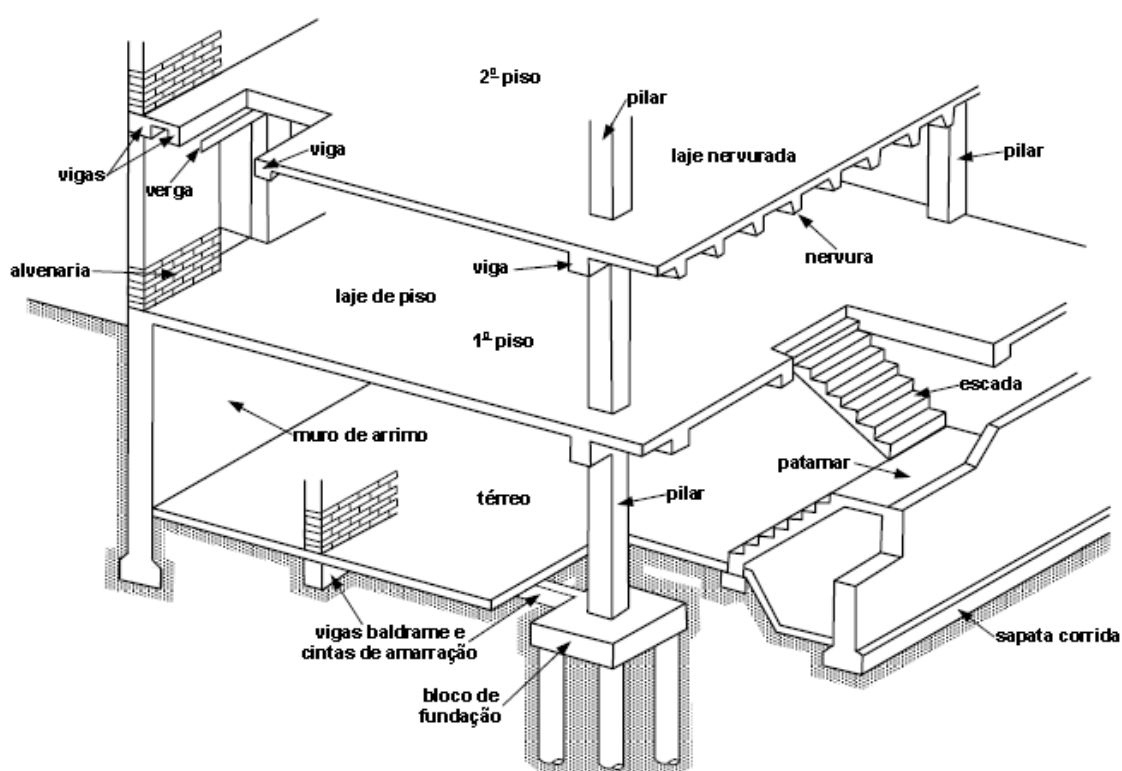


Figura 9 - Principais elementos estruturais a serem concebidos (ALVA, 2007)

A definição da melhor concepção estrutural, uma vez que não existe concepção certa ou errada, poderá ser influenciada por diversos fatores, tais como: objetivo comercial do empreendimento, limitações das características do terreno, prazo de execução, disponibilidade de sistema de fôrmas e escoramentos, entre outros (SILVA, 2011).

As alternativas levantadas pela equipe de engenharia de estruturas precisam estar de acordo com as diversas outras partes existentes no empreendimento: arquitetura, geotecnia, sistemas prediais (hidrossanitário e elétrico), administrativo (empresários e investidores), construtora, etc. Ou seja, as soluções estruturais serão analisadas por uma equipe multidisciplinar, de modo a agregar qualidade total ao projeto, que foi convencionado a se chamar de “compatibilização de projetos” (ALBUQUERQUE, 1999).

Com relação à segurança estrutural, deve-se partir de opções de concepção onde seja possível atender aos critérios de dimensionamento para Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS). O ELU refere-se ao esgotamento da capacidade portante devido à ruptura de seções críticas da estrutura, colapso da estrutura, perda do equilíbrio e deterioração por fadiga. Já o ELS está relacionado à durabilidade, aparência, conforto ao usuário e bom desempenho funcional, que podem ser afetados pela deformação excessiva para a utilização normal da estrutura, fissuração prematura ou excessiva, danos indesejáveis (corrosão), deslocamentos excessivos sem perda de estabilidade e vibrações excessivas. Estudos preliminares precisam também analisar, da forma mais coerente possível, as ações empregadas (vertical e horizontal), os métodos de cálculo (semi-probabilístico), estabilidade local e global e avaliação dinâmica (SILVA, 2011).

Outro aspecto afetado pela concepção é o custo. De acordo com Alva, em 2007, equívocos em diversos fatores acarretam em um aumento do custo, tais como:

- Falta de definição de um sistema de contraventamento adequado, que acarreta em estruturas que necessitarão de enrijecimento futuro;
- Má definição do posicionamento e quantidade de pilares, uma vez que poucos pilares exigem vãos maiores, com elementos mais robustos (maior consumo de concreto). Por outro lado, muitos pilares encarecem no custo de mão de obra, fundação e aumento do prazo. Além disso, pilares sem continuidade (gerando vigas de transição) e orientados na direção contrária aumentam o custo da estrutura;
- Falta de melhor definição de lajes, já que se podem variar as características de uma laje (tipo, espessura, ligação, enchimento, etc) para o mesmo pavimento, criando condições de até 30% de economia por pavimento;
- Pouco refinamento na seção transversal de vigas e pilares, utilizando dimensões desproporcionais para esforços que não exigem tantos recursos.

As recomendações de concepção aplicáveis às edificações residenciais em concreto armado são:

- Posicionar os pilares, de preferência, nos cantos das edificações e nos encontros das vigas;
- Procurar distanciar os pilares entre 2,5 e 6 m;
- Escolher regiões do pavimento onde os pilares não fiquem visíveis (cantos de armários embutidos, atrás de portas, etc);
- Verificar se os posicionamentos dos pilares são aceitáveis ao pavimento térreo e subsolo;
- Procurar, sempre que possível, posicionar as vigas para que estas formem pórticos com os pilares, havendo um enrijecimento da estrutura;

- Procurar lançar vigas onde existem paredes, evitando que as mesmas fiquem aparentes, contribuindo para o aspecto estético;
- Verificar a real necessidade de rebaixamento de uma laje em relação à outra para embutir as tubulações de sistemas prediais;
- Adotar para as lajes armadas em duas direções, menor vão de 3 a 6 m;
- Lajes de vãos muito pequenos resultam em grande quantidade de vigas, elevando o custo com as fôrmas.

2.1 Solução Convencional

2.1.1 Revisão Bibliográfica

Estruturas de concreto armado:

As estruturas de concreto armado com laje maciça são aquelas consideradas convencionais. A laje maciça possui toda sua espessura composta por concreto, contendo armaduras longitudinais de flexão e eventualmente armaduras transversais de cisalhamento. A laje é moldada in loco a partir do lançamento do concreto fresco sobre um sistema de fôrmas planas. Vigas ou paredes dão suporte para as lajes maciças.

O vão econômico das lajes está entre 3,5 m e 5 m, ou seja, a laje maciça apresenta dificuldade para vencer grandes vãos. Já a espessura varia usualmente entre 7 cm e 15 cm, sendo respeitados os valores mínimos da NBR6118:2014 descritos abaixo:

- 7 cm para cobertura não em balanço;
- 8 cm para lajes de piso não em balanço;
- 10 cm para lajes em balanço.

A Figura 10 apresenta a espessura da laje (h), largura de vigas (t_1 e t_2) e vão (l_0):

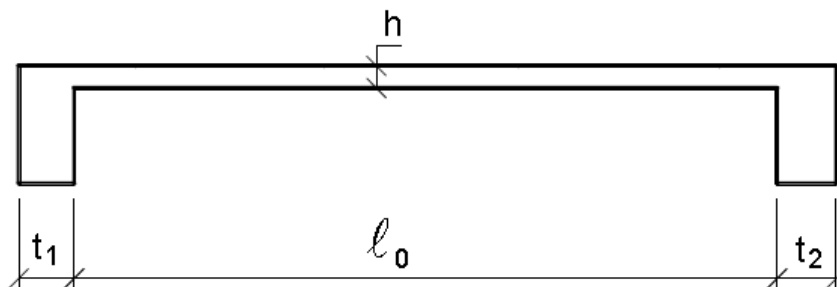


Figura 10 - Dimensões consideradas na laje maciça

De acordo com Albuquerque, em 1999, dentre as vantagens da laje maciça, podem ser citadas:

- Presença de muitas vigas garante, em conjunto com a laje, uma boa rigidez para os pórticos;
- Grande contribuição das mesas na deformação das vigas;
- Mão de obra treinada e barata.

E, dentre as desvantagens da laje maciça, podem ser citadas:

- Exigência de muitas vigas deixa o pavimento recortado, acarretando em perda de produtividade;
- Recortes diminuem o reaproveitamento do sistema de fôrmas;
- Apresenta grande consumo de concreto, aço e fôrmas;
- Grandes deformações verticais devido ao peso próprio do concreto

Agressividade do Ambiente:

O item 6.4 da NBR 6118 informa que a classe de agressividade do meio ambiente deve ser classificada de acordo com a Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental (NBR6118)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de Projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fracá	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1) 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1) 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1) 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

¹⁾ Pode-se admitir um micro-clima com classe de agressividade um nível mais branda para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade um nível mais branda em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Cobrimento Mínimo:

Os cobrimentos mínimos, presentes na Tabela 2, são obtidos de acordo com a classe de agressividade ambiental.

Tabela 2 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$

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

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

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

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

Abertura de Fissuras:

O estado limite de abertura das fissuras (ELS-W) se define pelo estado em que as fissuras se apresentam com aberturas iguais aos máximos especificados na Tabela 3.

Tabela 3 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	--
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4\text{ mm}$	Combinação freqüente
	CAA II a CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3\text{ mm}$	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{ mm}$	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{ mm}$	Combinação freqüente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação freqüente
		ELS-D ¹⁾	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D ¹⁾	Combinação freqüente

NOTAS:

¹⁾ A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 25\text{ mm}$ (figura 3.1).

1. As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2.

2. Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.

Incêndio:

As dimensões mínimas de laje maciça para o atendimento da situação de incêndio são apresentadas na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 - Dimensões mínimas para lajes apoiadas em vigas (NBR 15200:2004)

TRRF min	h^* mm	c_1 mm		
		Armada em duas direções		Armada numa direção
		$\ell_y / \ell_x \leq 1,5$	$1,5 < \ell_y / \ell_x \leq 2$	
30	60	10	10	10
60	80	10	15	20
90	100	15	20	30
120	120	20	25	40
* Dimensões mínimas para garantir a função corta-fogo.				

2.1.2 Modelo

Foi desenvolvido um modelo do edifício no software CAD/TQS. Este consiste de um sistema computacional gráfico destinado à elaboração de projetos de estrutura. O CAD/TQS é considerado integrado e completo, pois abrange a concepção estrutural, análise de esforços solicitantes e flechas, dimensionamento e detalhamento de armaduras e emissão de plantas.

2.1.2.1 Pré-Dimensionamento e Concepção Estrutural Inicial

Serão ilustrados a seguir os procedimentos de pré-dimensionamento e concepção do sétimo pavimento (PT5) do edifício (quinto pavimento residencial). A arquitetura previa a disposição apresentada na Figura 11, sendo que isso foi tido como uma concepção inicial para o pré-dimensionamento. Para os demais pavimentos, os mesmos procedimentos foram adotados.

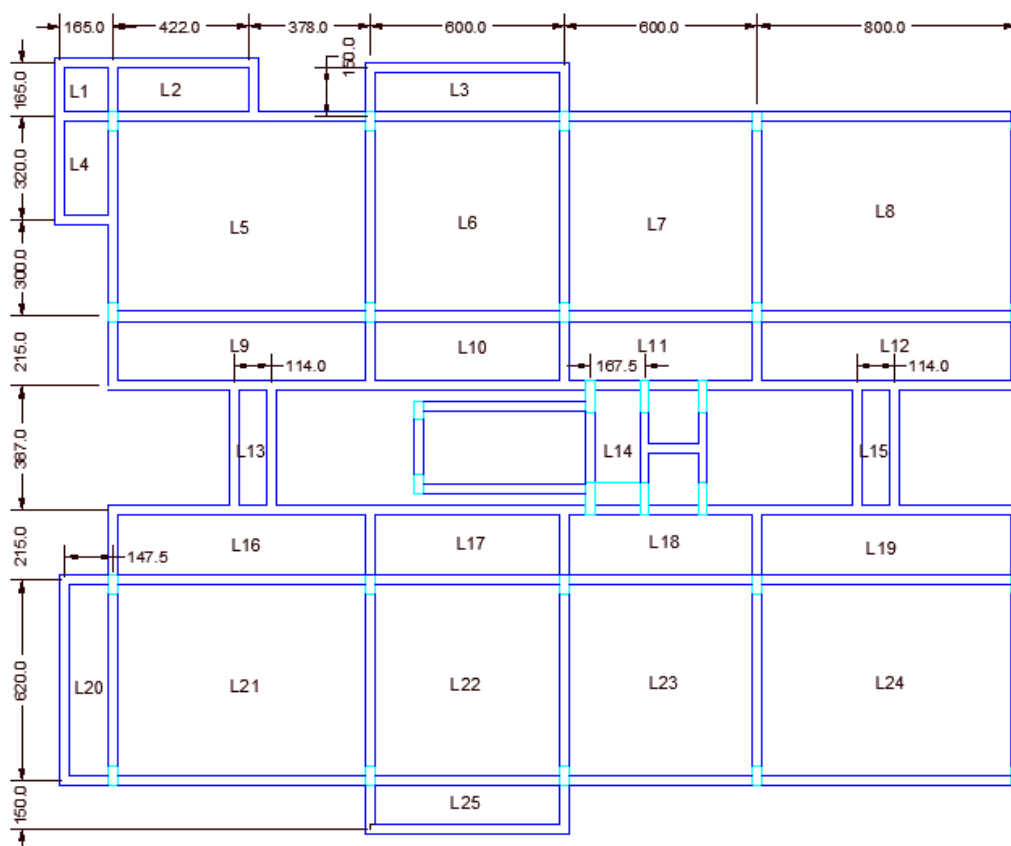


Figura 11 – Lançamento da estrutura do pavimento PT5 no CAD/TQS

A partir da concepção inicial, são obtidos parâmetros que guiam o cálculo do pré-dimensionamento, como por exemplo, vãos, número de bordas engastadas, áreas de contribuição e etc.

O pré-dimensionamento das lajes foi feito com base na Equação 1 a seguir:

Equação 1 - Pré-Dimensionamento de espessura de laje

$$h = d + c + \frac{\varnothing}{2}$$

c é o cobrimento utilizado (mínimo de norma);
 $\varnothing$ estimada como 10mm;

O cálculo da altura útil (d) é dada na Equação 2:

Equação 2 - Altura útil da laje

$$d = \frac{(2,5 - 0,1 \times n) \times l^*}{100}$$

n é o número de lados engastados em cada laje;
 l^* é o valor mínimo entre l_x e $0,7l_y$.

Portanto, a Tabela 5 a seguir resume os cálculos:

Tabela 5 - Pré-dimensionamento das lajes do sétimo pavimento (PT5)

Laje	lx (cm)	ly (cm)	l* (cm)	n	d (cm)	c (cm)	φ (mm)	h (cm)	h adotado (cm)
1	165	165	115,5	2	2,7	2,5	10	8,0	10
2	165	422	165	2	3,8	2,5	10	8,0	10
3	150	600	150	1	3,6	2,5	10	8,0	10
4	165	320	165	2	3,8	2,5	10	8,0	10
5	620	800	560	2	12,9	2,5	10	15,9	16
6	600	620	434	4	9,1	2,5	10	12,1	16
7	600	620	434	3	9,5	2,5	10	12,5	16
8	620	800	560	2	12,9	2,5	10	15,9	16
9	215	800	215	2	4,9	2,5	10	8,0	10
10	215	600	215	3	4,7	2,5	10	8,0	10
11	215	600	215	3	4,7	2,5	10	8,0	10
12	215	800	215	2	4,9	2,5	10	8,0	10
13	114	387	114	2	2,6	2,5	10	8,0	10
14	167,5	387	167,5	4	3,5	2,5	10	8,0	10
15	114	387	114	2	2,6	2,5	10	8,0	10
16	215	800	215	2	4,9	2,5	10	8,0	10
17	215	600	215	3	4,7	2,5	10	8,0	10
18	215	600	215	3	4,7	2,5	10	8,0	10
19	215	800	215	2	4,9	2,5	10	8,0	10
20	147,5	620	147,5	1	3,5	2,5	10	8,0	10
21	620	800	560	3	12,3	2,5	10	15,3	16
22	600	620	434	4	9,1	2,5	10	12,1	16
23	600	620	434	3	9,5	2,5	10	12,5	16
24	620	800	560	3	12,3	2,5	10	15,3	16
25	150	600	150	1	3,6	2,5	10	8,0	10

O pré-dimensionamento da altura das vigas dos tramos externo, tramos internos e em balanço foi feito com base na Equação 3.

Equação 3 - Pré-Dimensionamento de altura de viga

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{\text{interno}} = \frac{lm_{\text{máx}}}{12} \\ h_{\text{externo}} = \frac{lm_{\text{máx}}}{10} \\ h_{\text{balanço}} = \frac{lm_{\text{máx}}}{5} \end{array} \right\}$$

A Tabela 6 a seguir resume os cálculos:

Tabela 6 - Pré-Dimensionamento das vigas do sétimo pavimento (PT5)

Direção x			
Vão máximos (cm)		h (cm)	h adotado (cm)
Tramo interno	800	66,7	60
Tramo externo	800	80	60
Balanço	165	33	60
Direção y			
Vão máximos (cm)		h (cm)	h adotado (cm)
Tramo interno	620	51,7	60
Tramo externo	620	62	60
Balanço	215	43	60

O pré-dimensionamento dos pilares foi feito com base na Equação 4:

Equação 4 - Pré-Dimensionamento da área da seção do pilar

$$A_c = \frac{30 \times \alpha \times A \times (n + 0,7)}{f_{ck} + 0,01 \times (69,2 - f_{ck})}$$

A_c é a área da seção do pilar (cm²);

A é o coeficiente que considera as excentricidades de carga;

$\alpha = 1,3$ para pilares internos ou de extremidade, na direção da maior dimensão;

$\alpha = 1,5$ para pilares de extremidade na direção de menor dimensão;

$\alpha = 1,8$ para pilares de canto;

A é a área de influência de cada pilar (m²);

n é o número de pavimentos;

$(n + 0,7)$ é a consideração para as cargas de cobertura que representam 70%;

f_{ck} é a resistência característica do concreto (kN/cm²).

Portanto, a Tabela 7 resume os cálculos para o caso de seção quadrada. É possível que sejam utilizadas diferentes seções transversais, apenas alterando as dimensões em planta dos elementos, mantendo a mesma área de seção do pilar.

Tabela 7 – Pré-Dimensionamento dos pilares do sétimo pavimento (PT5)

Pilares	Alfa	Ainfluência (m ²)	n	fck (kN/cm ²)	Aseção (cm ²)	b=h (cm)
Interno	1,3	39,0	15	2,5	7531,6	86,8
Canto	1,8	24,0	15	2,5	6411,4	80,1
Extremidade	1,5	27,4	15	2,5	6104,7	78,1

2.1.2.2 Carregamentos

Os carregamentos foram obtidos tendo por base a concepção adotada, bem como as indicações previstas na norma NBR6120 (Cargas para cálculo) e NBR6123 (Forças devido aos ventos)

Sobre os carregamentos verticais:

- Pavimento 1 (sala de leitura da biblioteca)

As cargas permanentes consideradas foram:

- Peso próprio dos elementos estruturais, calculados automaticamente de acordo com a geometria;
- Carregamento permanente de 1 kN/m^2 distribuído nas lajes, sendo os elementos construtivos e instalações permanentes;
- Parapeito de $1,5 \text{ kN/m}$ nas regiões centrais;
- Alvenaria em tijolo vazado com espessura de 15 cm e $4,3 \text{ kN/m}$.

As cargas acidentais consideradas foram:

- Carregamento acidental de $2,5 \text{ kN/m}^2$ distribuído nas lajes, por se tratar de uma sala de leitura de biblioteca.

- Demais pavimentos (abrigo e residenciais)

As cargas permanentes consideradas foram:

- Peso próprio dos elementos estruturais, calculados automaticamente de acordo com a geometria;
- Carregamento permanente de 1 kN/m^2 distribuído nas lajes, sendo os elementos construtivos e instalações permanentes;
- Parapeito de $1,5 \text{ kN/m}$ nas regiões de sacada e corredores da circulação interna;
- Alvenaria em tijolo vazado com espessura de 15 cm e $4,3 \text{ kN/m}$ para as vedações internas aos apartamentos;
- Bloco de concreto com espessura de 14 cm e $5,7 \text{ kN/m}$ para vedações entre apartamentos;
- Vedação em vidro temperado com espessura de 10 mm e $0,57 \text{ kN/m}$.

As cargas acidentais consideradas foram:

- Carregamento acidental de $1,5 \text{ kN/m}^2$ distribuído nas lajes, por se tratar apartamentos residenciais.

Sobre os carregamentos horizontais:

Os carregamentos horizontais são determinados a partir da norma NBR 6123:1988 Forças devidas ao vento em edificações.

As forças estáticas devidas ao vento são determinadas do seguinte modo:

A velocidade básica do vento, V_0 , adequada ao local onde a estrutura será construída, é determinada de acordo com a isopleta da Figura 12 a seguir:

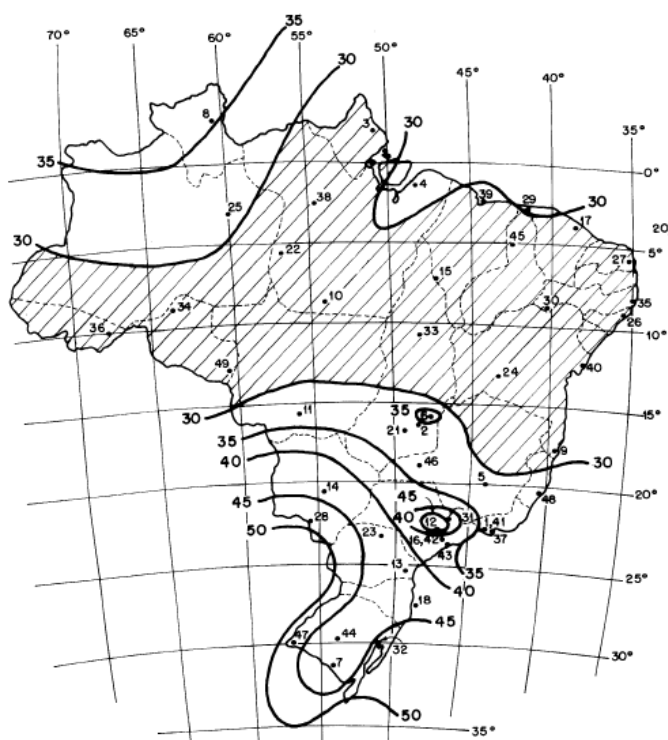


Figura 12 - Isopleta de velocidade básica do vento, V_0 (NBR6123)

- A velocidade básica é, então, multiplicada pelos fatores S_1 , S_2 e S_3 para ser obtida a velocidade característica do vento (V_k), representada na Equação 5:

Equação 5 - Velocidade característica do vento

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3$$

- A velocidade característica do vento permite determinar a pressão dinâmica pela Equação 6 sendo q em N/m^2 e V_k em m/s .

Equação 6 - Pressão dinâmica

$$q = 0,613 \times V_k^2$$

A velocidade básica do vento (V_0) para a cidade de São Paulo vale 40 m/s.

S_1 é o fator topográfico do terreno. A norma indica que quando o terreno for plano ou fracamente acidentado, que é o caso do edifício em estudo, $S_1 = 1,0$.

S_2 é o fator que avalia a rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno. A norma indica que quando o terreno é coberto por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados, como centros de grandes cidades, a categoria a ser adotada é a Categoria V. Para edificações onde a maior dimensão vertical ou horizontal esteja dentro do intervalo de 20 m a 50 m, o edifício é Classe B. Desse modo, o fator S_2 é obtido na Tabela 8 e varia com a altura do edifício.

Tabela 8 - Fator S2 (NBR6123)

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

S3 é o fator estatístico que considera o grau de segurança e vida útil requerido para a edificação. A norma indica que o Grupo 2, composto de edificações para hotéis e residências, edificações para comércio e indústrias com alto fator de ocupação, possui $S3 = 1,0$, como apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Fator S3 (NBR6123)

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

O coeficiente de arrasto foi considerado valendo 1,0 por simplicidade, uma vez que se torna muito específica a análise para o edifício em estudo.

Com posse dos valores apresentados até aqui, o CAD/TQS calcula automaticamente as cargas de vento que serão aplicadas localmente em cada encontro de viga e pilar. Além disso, a força pontual do vento é dividida em todos os pilares dos pórticos espaciais, tornando a análise mais realista.

2.1.2.3 Processamento e Estrutura Final

Durante o processamento, a estrutura convencional concebida inicialmente apresentava falhas em relação ao Estado Limite de Serviço, já que os deslocamentos apresentavam valores excessivos. Assim, as medidas apresentadas a seguir foram tomadas para que tanto o Estado Limite Último e de Serviço fossem atendidos:

- Adoção de concreto com maiores resistências:

Inicialmente, estava sendo utilizado o concreto classe C25 para todos os pavimentos. Posteriormente, os pavimentos Biblioteca e Abrigo passaram a utilizar concreto classe C40, como indicado na Figura 13.

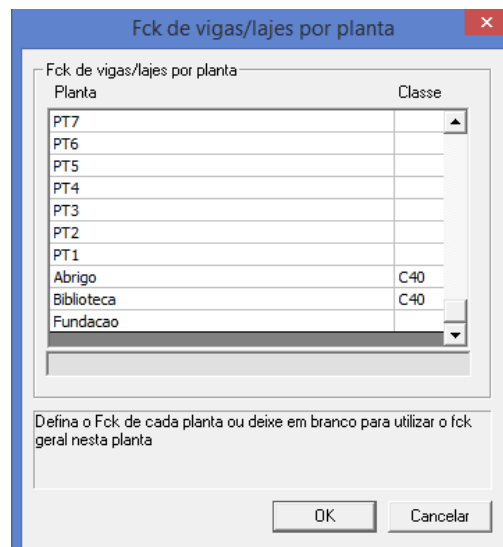


Figura 13 – Concreto classe C40 no Abrigo e Biblioteca

O pavimento PT9 passou a utilizar concreto classe C35, como indicado na Figura 14.

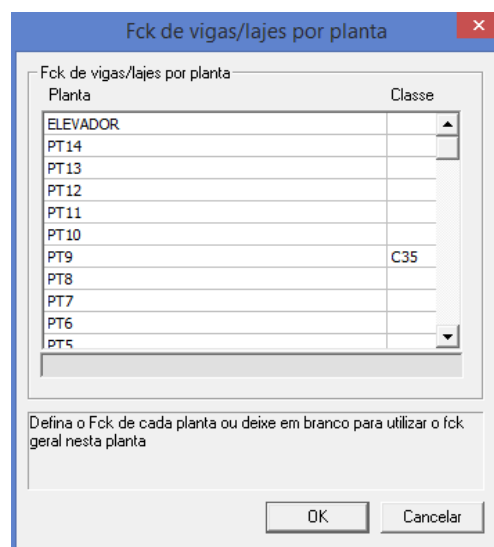


Figura 14 - Concreto classe C35 no pavimento PT9

Os demais pavimentos passaram a utilizar concreto classe C30, como indicado na Figura 15.

Fcks gerais	
Vigas/Lajes	Classe C30
Pilares	C30
Fundações	C30
☐ Desativar a verificação de Fck mínimo	

Figura 15 – Concreto classe C30 para os demais pavimentos

- Adição de vigas entre pilares que antes não haviam sido adotadas:

A viga V2 (40 x 20 cm) da Figura 16 foi inserida no pavimento PT9 para reduzir deslocamentos verticais das lajes.

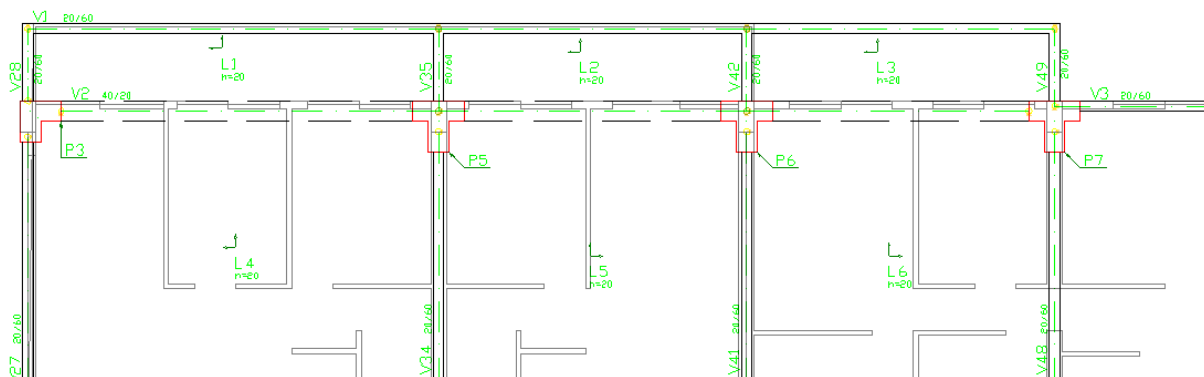


Figura 16 – Trecho em planta do pavimento PT9 na Solução Convencional

- Vigas em balanço com comprimentos menores (redução do balanço) e alturas maiores (aumento de rigidez):

No pavimento Biblioteca, as vigas em balanço V14 e V23, representadas na Figura 17, passaram a ter comprimento de 3,09 m e seção de 30 x 120 cm, quando antes possuíam comprimento de 4,82 m e seção de 30 x 100 cm.

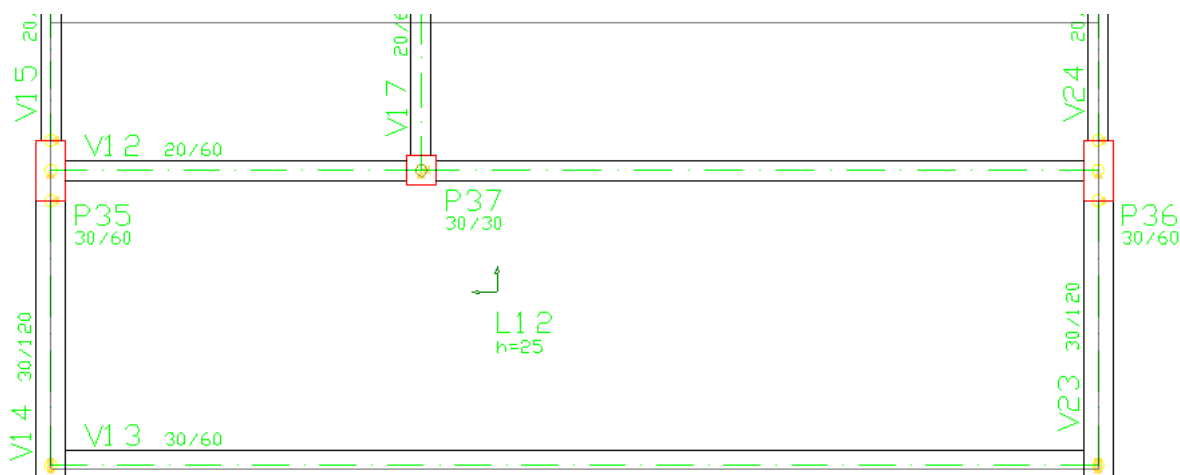


Figura 17 – Pavimento Biblioteca da Solução Convencional com as vigas V14 e V23 de menor comprimento e maior altura

No pavimento Abrigo, as vigas em balanço V26 e V32, representadas na Figura 18, passaram a ter comprimento de 3,09 m quando antes era 4,82 m, entretanto, a seção foi mantida em 30 x 100 cm pelo fato de os carregamentos serem inferiores ao presente no pavimento Biblioteca.

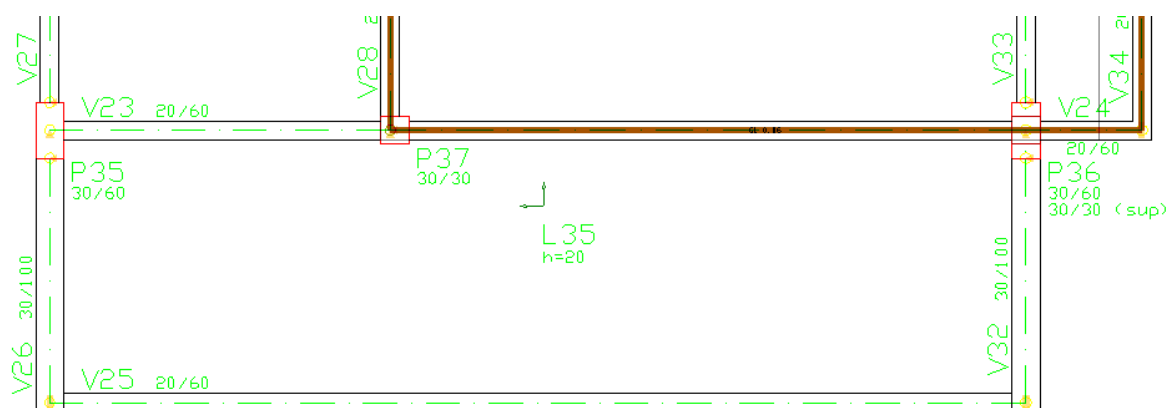


Figura 18 - Pavimento Abrigo da Solução Convencional com as vigas V26 e V32 de menor comprimento

A Figura 19 representa a região no modelo estrutural onde foram feitas as alterações citadas acima:

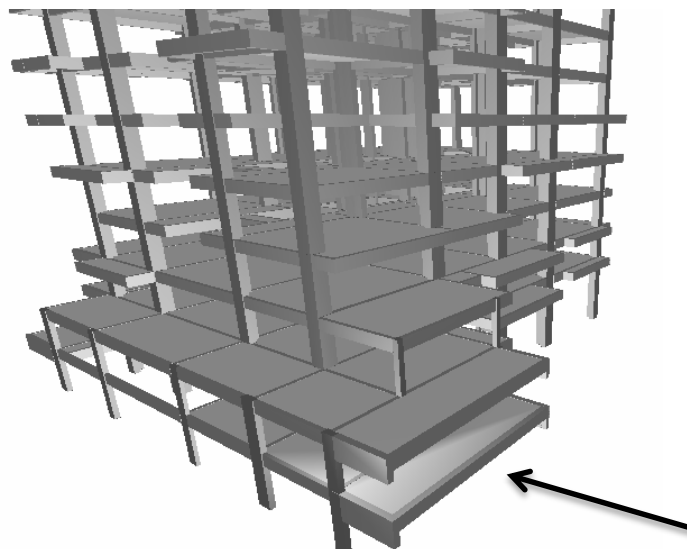


Figura 19 – Região do modelo estrutural da Solução Convencional com vigas em balanço de comprimento menor e altura maior

No pavimento Abrigo, as vigas em balanço V5 e V55, representadas na Figura 20, passaram a ter seção transversal de 30 x 80 cm quando antes era 20 x 60 cm, entretanto, os comprimentos foram mantidos para atender à arquitetura.

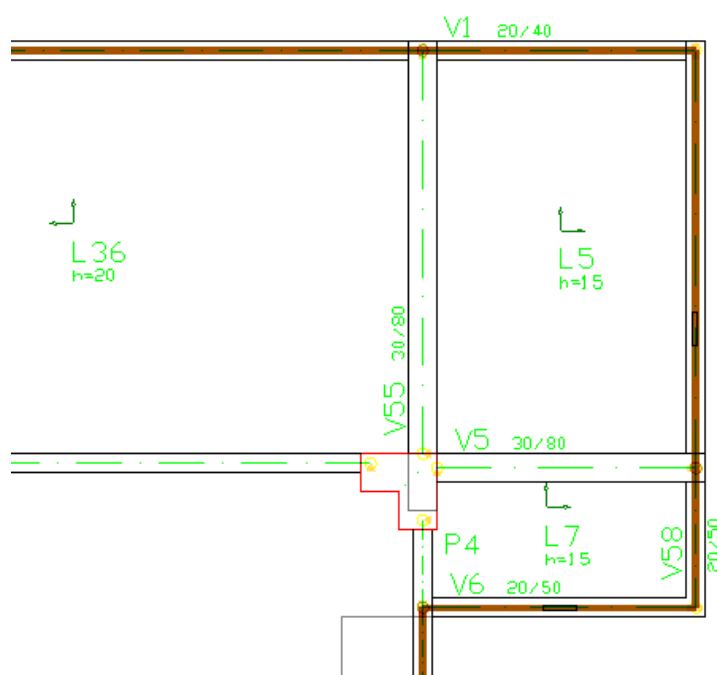


Figura 20 - Pavimento Abrigo da Solução Convencional com as vigas V5 e V55 com maiores seções transversais

A Figura 21 representa a região no modelo estrutural onde foram feitas as alterações citadas acima:

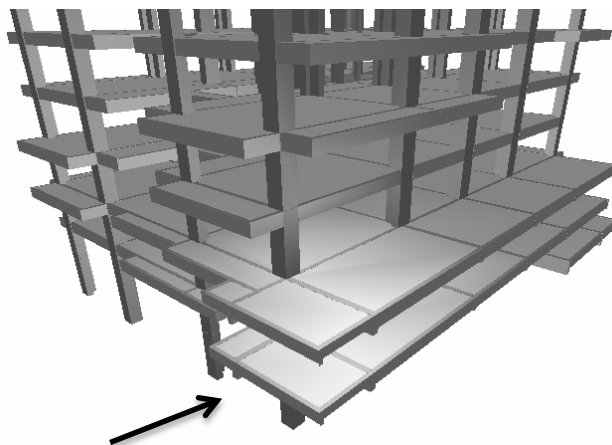


Figura 21 - Região do modelo estrutural da Solução Convencional com vigas em balanço de maior seção transversal

- Lajes e vigas de borda das varandas/extensões com seções menores (redução do peso próprio):

Para diminuir o peso próprio da estrutura, o pavimento Abrigo, as vigas de borda V1 e V58, representadas na Figura 20 passaram a ter seções de 20 x 40 cm e 20 x 50 cm, respectivamente, quando antes ambas possuíam 20 x 60 cm. As lajes L5 e L7, representadas também na Figura 20, passaram a ter espessuras de 15 cm, quando antes possuíam 20 cm.

No pavimento PT1, ocorre a mesma redução de seção transversal para as vigas V1 e V54, representadas na Figura 22, que passaram a ter seções de 20 x 40 cm e 20 x 50 cm, quando antes ambas possuíam 20 x 60 cm. As lajes L5 e L6, também representadas na Figura 22, passaram a ter espessuras de 15 cm, quando antes possuíam 20 cm.

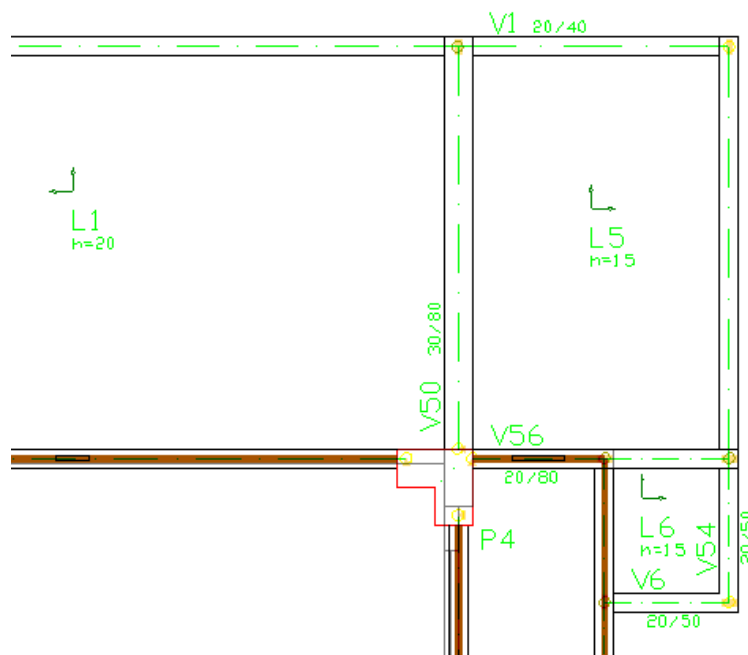


Figura 22 - Pavimento PT1 da Solução Convencional com vigas de borda de menor seção e lajes de menor espessuras

- Adição de pilares:

No pavimento Biblioteca, a adição do pilar P37, representado na Figura 17, reduz o vão livre da viga V12.

Da mesma forma, no pavimento Abrigo, a adição do pilar P37, representado na Figura 18, reduz o vão livre da viga V23.

No pavimento PT1, a adição dos pilares P36 e P37, representados na Figura 23, reduz o vão livre da viga V26 e extingue o balanço que antes existia para a viga V26.

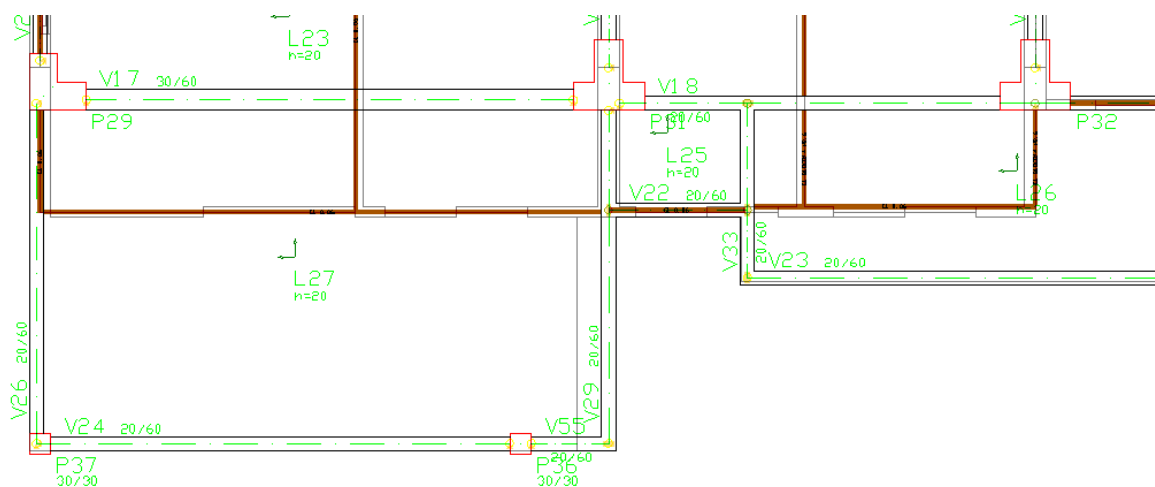


Figura 23 - Pavimento PT1 da Solução Convencional com adição dos pilares P36 e P37

A Figura 24 representa a região no modelo estrutural onde foram feitas as alterações citadas acima:

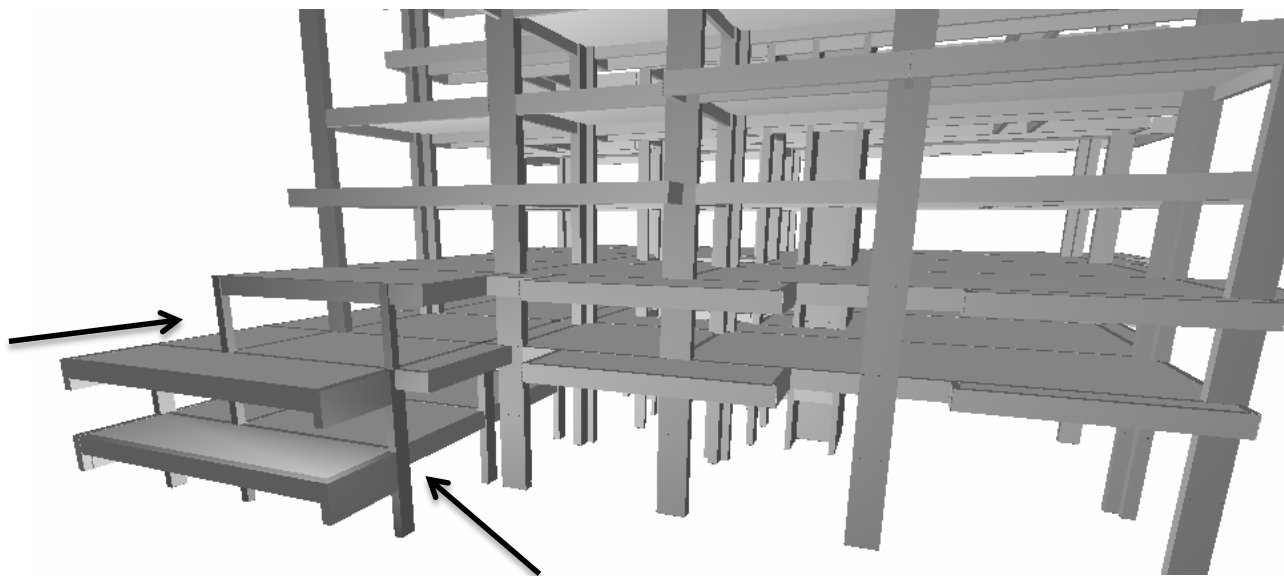


Figura 24 - Região do modelo estrutural da Solução Convencional com a adição de pilares

Com todas as medidas citadas nos itens acima, foi possível processar o modelo atendendo ao Estado Limites Último e de Serviço. Assim, são obtidos o modelo estrutural e concepção final. Na Figura 25 está representado o modelo estrutural, na Figura 26 o pavimento PT5 e na Figura 27 o pavimento Biblioteca, estes dois últimos sendo apenas exemplos da aplicação dos procedimentos de modelagem.

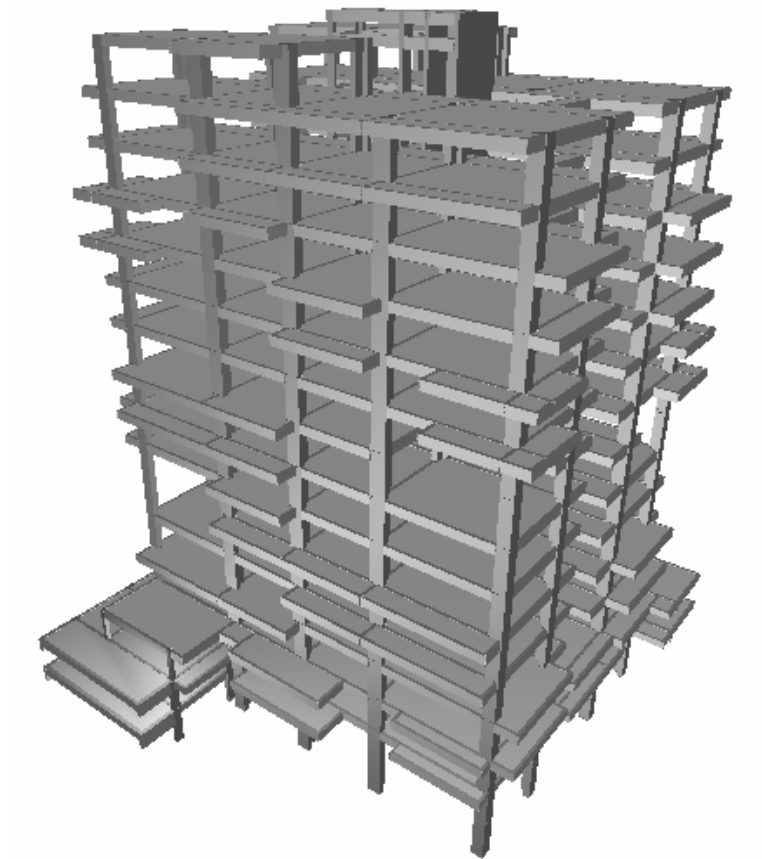


Figura 25 - Modelo estrutural da Solução Convencional

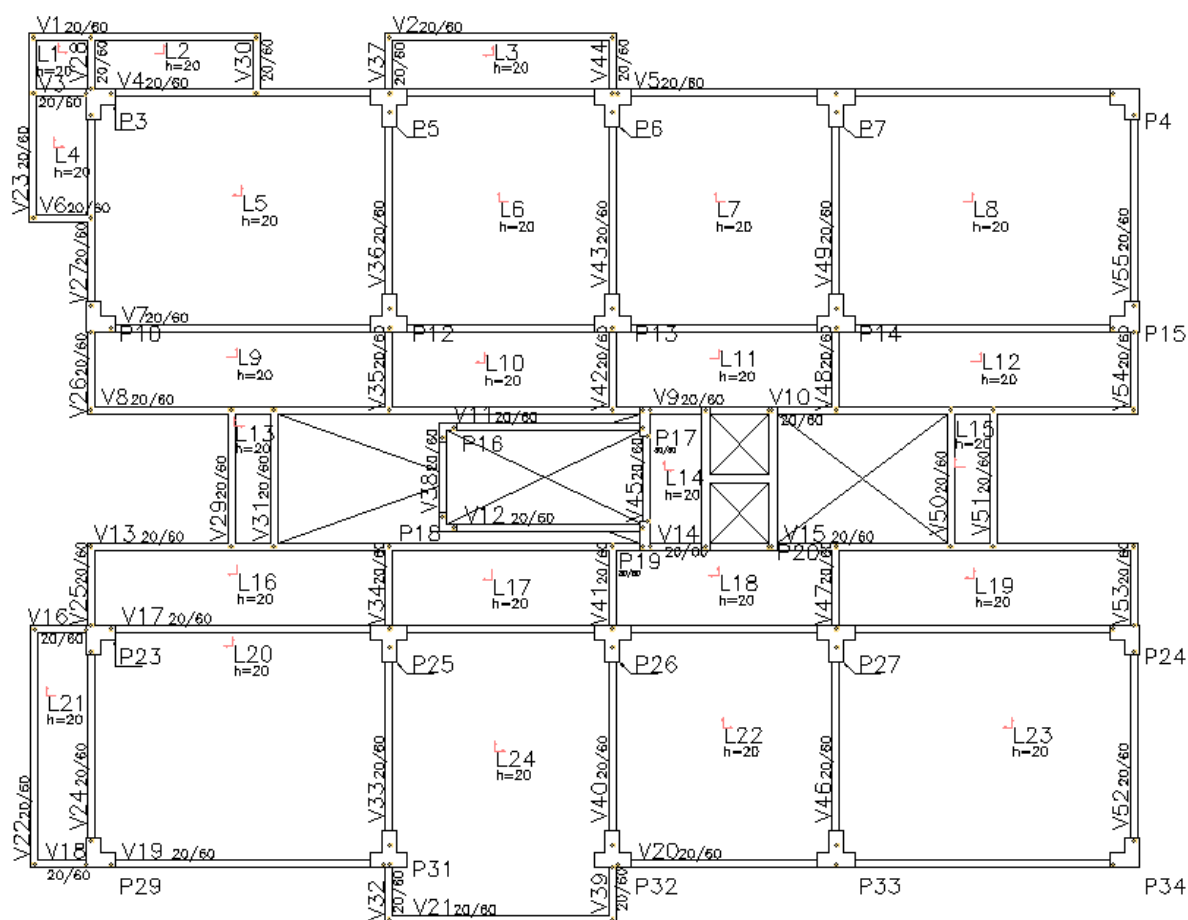


Figura 26 - Desenho de fôrmas do pavimento PT5 da Solução Convencional

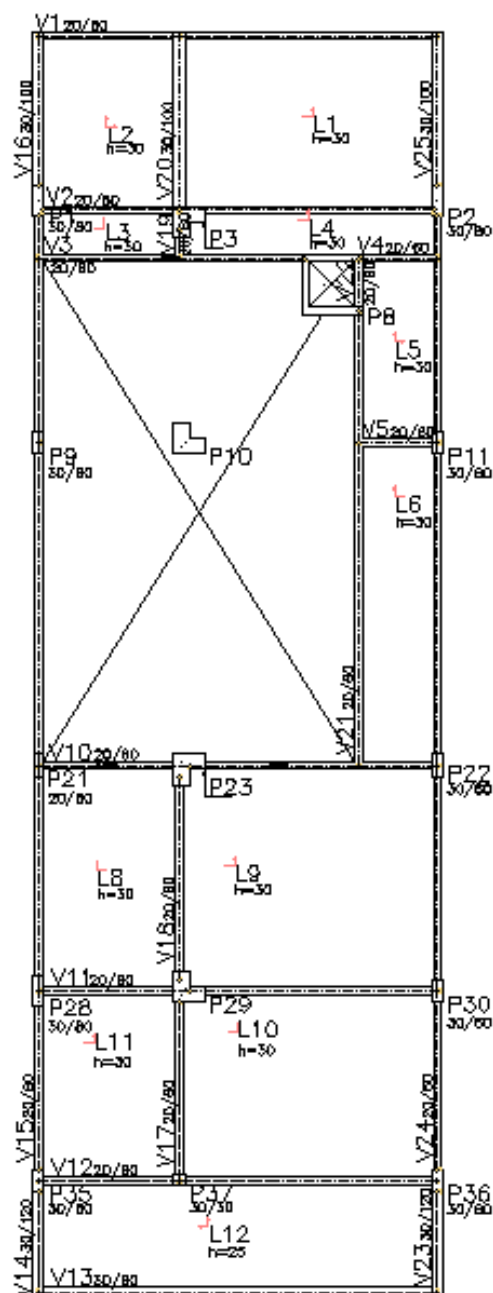


Figura 27 - Desenho de fôrmas do pavimento Biblioteca da Solução Convencional

2.1.2.4 Armaduras

O CAD/TQS processa o dimensionamento das armaduras segundo os critérios de norma. Como o presente estudo não visa um aprofundamento técnico nos aspectos de detalhamento de armadura, em termos de ancoragem, transpasse, decalagem, etc; serão apresentados apenas trechos dos desenhos de armaduras dos elementos estruturais. Com base no dimensionamento e detalhamento produzido pelo software, são geradas as tabelas de consumo de aço que, juntamente com concreto e fôrmas, balizam a análise.

Considerando a região em balanço do pavimento Biblioteca, presente na Figura 27, as armaduras negativas verticais presentes nas lajes L10 ($h = 30$ cm), L11 ($h = 30$ cm) e L12 ($h = 25$ cm) são apresentadas na Figura 28.

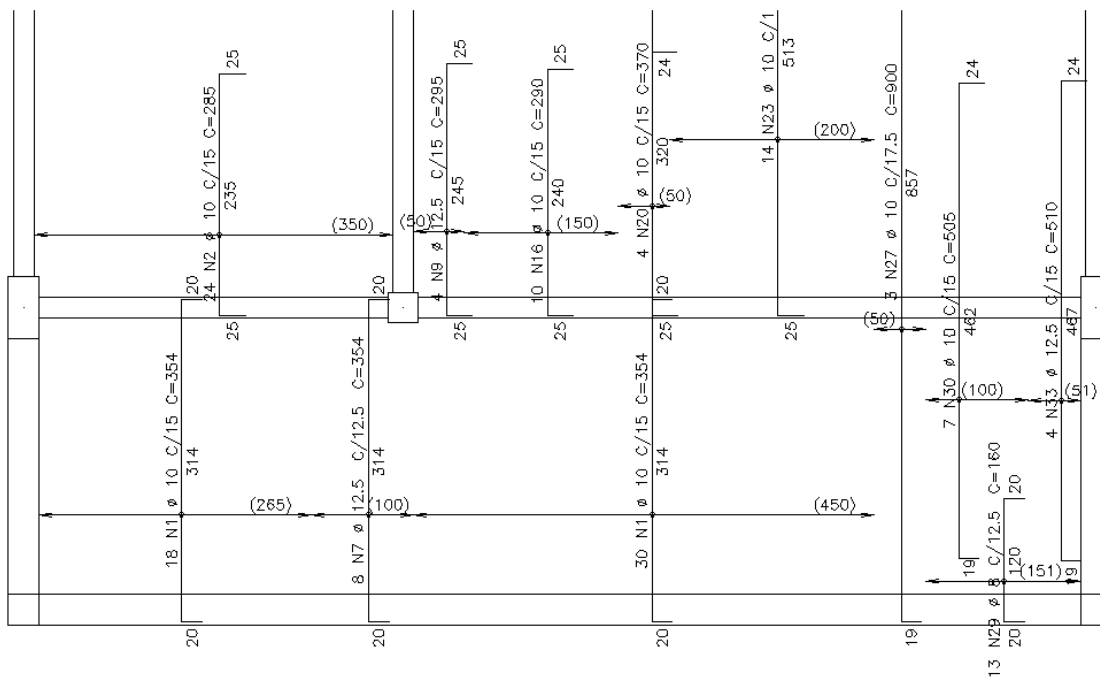


Figura 28 - Armaduras verticais negativas nas lajes L10, L11 e L12 do pavimento Biblioteca da
Solução Convencional

A viga V12 (20 x 60 cm), também presente na Figura 27, possui as armaduras dimensionadas na Figura 29.

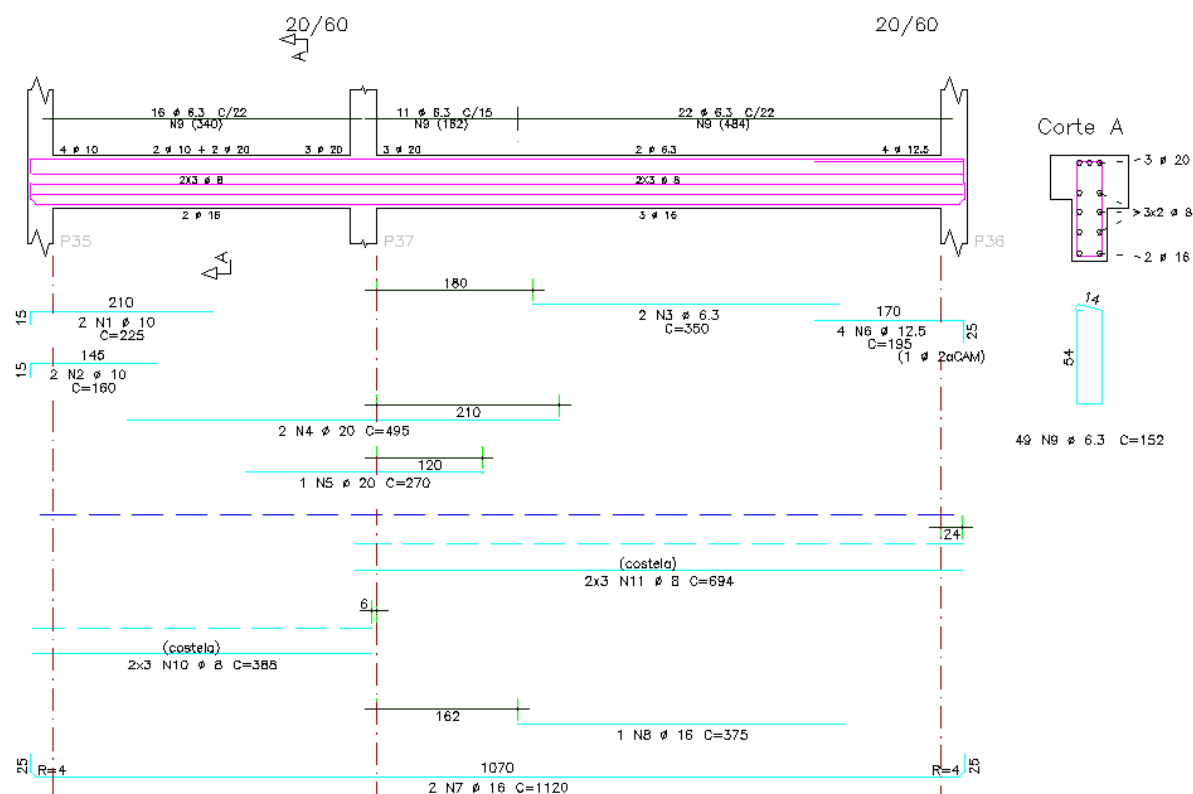


Figura 29 - Armaduras da viga V12 do pavimento Biblioteca da Solução Convencional

O pilar P37 (30 x 30 cm), também presente na Figura 27, possui as armaduras dimensionadas na Figura 30.

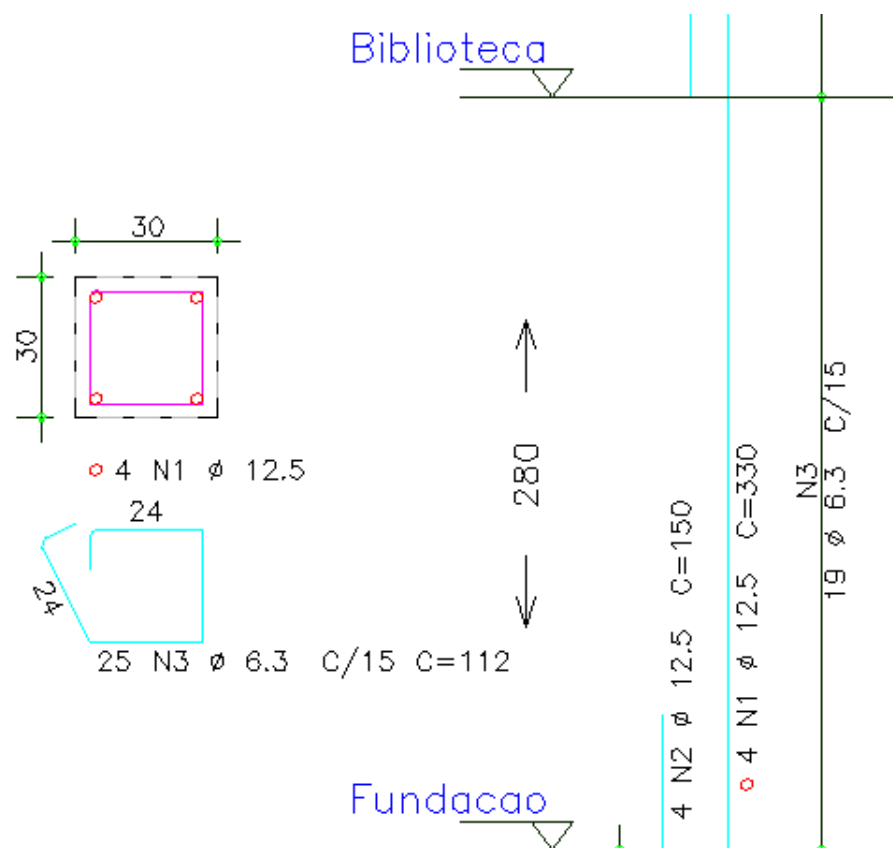


Figura 30 - Armaduras do pilar P37 da Solução Convencional

2.1.3 Atendimento ao Desempenho

A. Flechas

Deve-se verificar se as flechas no edifício projetado atendem aos limites de flecha explicitados pela NBR 6118, e apresentados pelo CAD/TQS na Tabela 10.

Tabela 10 - Referente à situação de flecha máxima, para a solução de laje maciça

	LAJE MACIÇA			
	Laje	Flecha Máxima (cm)	Flecha Limite (cm)	Situação de flecha máxima em relação à flecha limite (%)
Elevador	2	0,2	1	20
PT14	5	1,5	2,2	68
PT13	6	1,4	2,3	61
PT12	6	1,6	1,7	94
PT11	21	1,4	2,2	64
PT10	1	1,4	2,3	61
PT9	4	1,6	1,6	100
PT8	11	1,2	2,3	52
PT7	20	1,6	3	53
PT6	13	1,5	2,3	65
PT5	8	1,1	2,3	48
PT4	23	1,7	1,8	94
PT3	21	1,2	2,2	55
PT2	19	1,8	3	60
PT1	5	2,9	3	97
Abrigo	5	2,7	3	90
Biblioteca	1	1,8	2,3	78
				68

Através dos valores fornecidos pelo CAD/TQS de flecha máxima por pavimento e de sua respectiva flecha limite (representados na Tabela 10 acima), verifica-se que todos os pavimentos atendem ao estado limite de deformações excessivas (ELS-DEF) da NBR 6118 – critério uma vez não atendido no dimensionamento inicial da estrutura.

Observou-se que se deve atentar ao deslocamento da laje 4 do pavimento PT9, onde o valor da flecha máxima é igual ao valor da flecha limite. Verificou-se também, que a laje 2 do pavimento do Elevador se encontra em uma situação bastante abaixo de sua capacidade de deslocamento, sugerindo oportunidades de otimização de material estrutural a serem exploradas.

B. Abertura de Fissuras

De acordo com a NBR 6118, para análise do estado limite de fissuração, deve-se garantir que as fissuras obtidas na estrutura sejam menores que o estado limite de abertura de fissuras (ELS-W). Pela Tabela 3 do item 2.1.1, tem-se que, para concreto armado simples de classe de agressividade ambiental CAA II (definida pela Tabela 1 do mesmo item), exige-se que $w_k \leq 0,3$ mm.

A Figura 31, Figura 32 e Figura 33 extraídas do software CAD/TQS, ilustram gráfica e numericamente as estimativas de fissuras no pavimento 1. Como todas as fissuras apresentam valores menores que 0,3 mm (como mostrado na seção 2.1.1), conclui-se que o pavimento atende o estado limite de formação de fissuras (ELS-W).

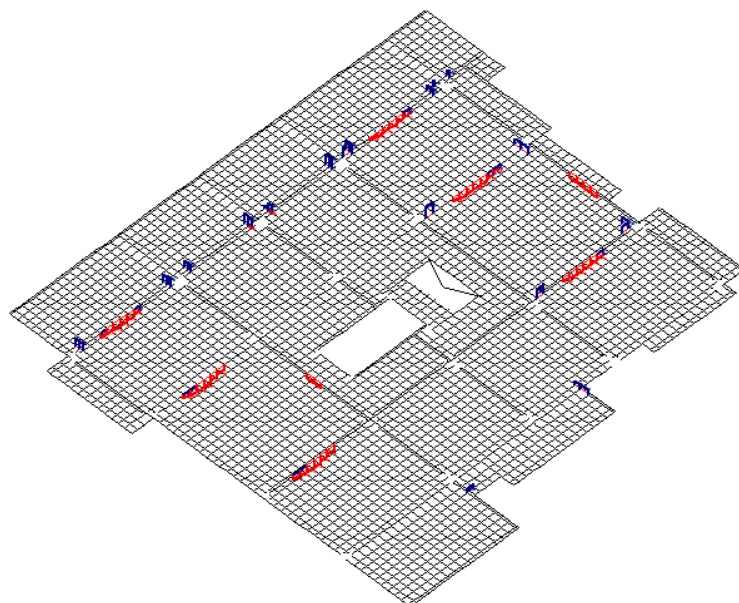


Figura 31 – Aspecto geral da abertura de fissuras no pavimento PT1 da Solução Convencional

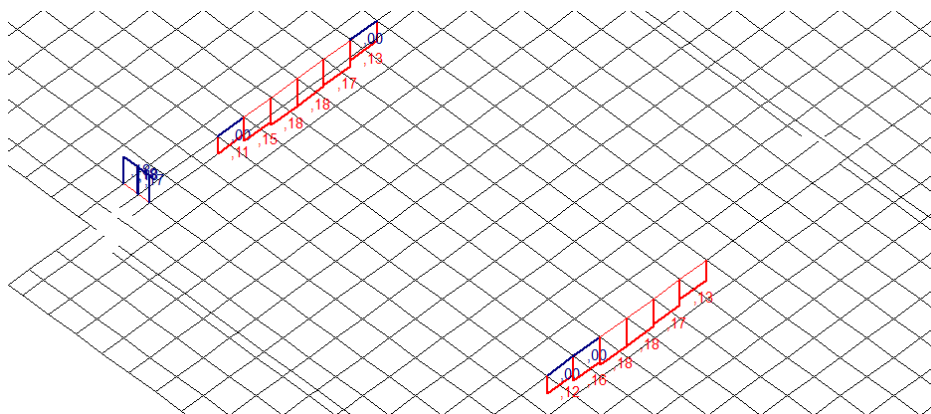


Figura 32 - Ampliação da abertura de fissuras no pavimento PT1 da Solução Convencional com abertura máxima de 0,18 mm

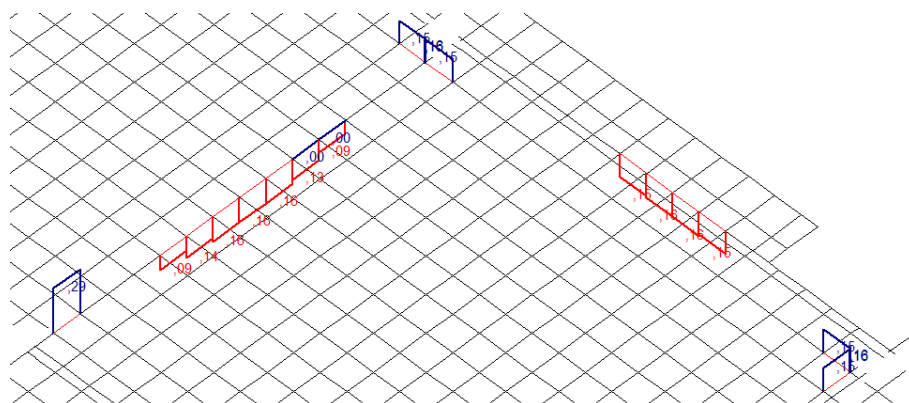


Figura 33 - Ampliação da abertura de fissuras no pavimento PT1 da Solução Convencional com abertura máxima de 0,29 mm

2.1.4 Quantitativos

Além dos desenhos de fôrma e armadura obtidos, que são os produtos finais de um projeto, o CAD/TQS fornece tabelas de quantitativos. Nestas, estão presentes entre várias informações, os volumes de concreto em m³ (por elemento estrutural do pavimento), quantidade de fôrmas de madeira em m² (por elemento estrutural do pavimento) e quantidade de aço (por elemento estrutural do pavimento). A Tabela 11 apresenta estes valores.

Com posse dos quantitativos, é possível calcular taxas de consumo de armadura (kg/m³) e fôrma (m²/m³). A Tabela 12 apresenta estes valores.

Esses dados são fundamentais para a análise posterior, visando uma obtenção de estimativas de custos para a estrutura e quantidade de trabalho.

Tabela 11 - Tabela de Quantitativos para a Solução Convencional

Pavimento	Concreto (m ³)				Fôrmas (m ²)				Armadura (kg)			
	Pilares (m ³)	Vigas (m ³)	Lajes (m ³)	Total (m ³)	Pilares (m ²)	Vigas (m ²)	Lajes (m ²)	Total (m ²)	Pilares (kg)	Vigas (kg)	Lajes (kg)	Total (kg)
BIBLIOTECA	49,1	25,2	62,5	136,8	365,3	209,3	214,6	789,2	5714,3	2393,2	4005,1	12112,6
ABRIGO	43,8	50,1	161,8	255,7	326,2	447,2	812,7	1586,1	1289,9	6062,3	9545,6	16897,8
PT1	37,1	41,8	144,7	223,6	258,7	376,2	726,5	1361,4	2126,4	5332,4	7507,9	14966,7
PT2	41	31,6	96,8	169,4	283	308,9	483,8	1075,7	2321,8	3266,1	5138,9	10726,8
PT3	41	35,2	100,1	176,3	283	343,8	500,3	1127,1	2307,7	3590,8	4990,2	10888,7
PT4	41	34,2	93,5	168,7	283	334,2	467,5	1084,7	2375,4	3636,4	5022,7	11034,5
PT5	41	33,8	96,5	171,3	283	327,7	482,7	1093,4	2232,9	3533,6	4837,2	10603,7
PT6	41	33,6	90,9	165,5	283	323,5	454,4	1060,9	2375,4	3688	4790,3	10853,7
PT7	41	32,2	90,7	163,9	283	312,4	453,7	1049,1	2300,6	3232,7	4894,8	10428,1
PT8	41	38,4	102,3	181,7	283	369,3	511,4	1163,7	2232,9	3819	5187,7	11239,6
PT9	41	36,4	100,8	178,2	283	349,3	504	1136,3	2307,7	4218,6	5552,2	12078,5
PT10	41	33,3	96,8	171,1	283	328,9	484,2	1096,1	2307,7	3277,6	4915,3	10500,6
PT11	41	35,7	93,4	170,1	283	350,2	466,9	1100,1	2375,4	3429,1	4835,2	10639,7
PT12	41	34,2	99,6	174,8	283	331,6	498,2	1112,8	2232,9	3423,9	5120	10776,8
PT13	41	34,9	101,3	177,2	283	340,2	506,7	1129,9	2248,3	3321,8	5279,7	10849,8
COBERTURA	28,5	13,1	36,7	78,3	202,4	130,2	183,3	515,9	1534,9	1155,6	1690,9	4381,4
ELEVADOR	3,7	2,4	4,6	10,7	33	23,3	22,9	79,2	208,3	201,8	277,4	687,5
TOTAL	654,2	546,1	1573	2773,3	4581,6	5206,2	7773,8	17561,6	38492,5	57582,9	83591,1	179666,5

Tabela 12 - Tabela de taxas de consumo da estrutura para a Solução Convencional

Pavimento	Taxas	
	Consumo de Armadura (kg/m³)	Consumo de Fôrmas (m²/m³)
BIBLIOTECA	88,54	5,77
ABRIGO	66,08	6,20
PT1	66,94	6,09
PT2	63,32	6,35
PT3	61,76	6,39
PT4	65,41	6,43
PT5	61,90	6,38
PT6	65,58	6,41
PT7	63,62	6,40
PT8	61,86	6,40
PT9	67,78	6,38
PT10	61,37	6,41
PT11	62,55	6,47
PT12	61,65	6,37
PT13	61,23	6,38
COBERTURA	55,96	6,59
ELEVADOR	64,25	7,40
MÉDIA	64,7	6,4

2.2 Solução de Laje Nervurada

2.2.1 Revisão Bibliográfica

A estrutura de concreto armado com Laje Nervurada é aquela onde um conjunto de vigas se cruzam, sendo solidarizadas por uma mesa. Dessa forma, o comportamento estrutural é um intermediário entre laje maciça e grelha (PINHEIRO, 2007).

Como as armaduras longitudinais são responsáveis pela resistência a tração, as zonas tracionadas podem ser discretizadas como nervuras, não comprometendo as zonas comprimidas, resistida pela mesa.

As lajes nervuradas surgiram da necessidade arquitetônica de aumento dos vãos, uma vez que a redução de peso próprio nas nervuras propicia menores deformações verticais. As nervuras podem ser executadas com fôrmas reaproveitáveis ou perdidas, sendo as primeiras de metal ou propileno e as últimas mais comumente em isopor, tijolo cerâmico ou bloco de cimento. É válido ressaltar que o material de enchimento (material inerte) não é considerado como parte resistente. A Figura 34 apresenta uma seção transversal de Laje Nervurada com tijolos representando o material de enchimento. Além disso, são representadas as dimensões que caracterizam a Laje Nervurada, como a largura da nervura (b_w), largura da forma ou material de preenchimento (a), largura colaborante da mesa (b_f), altura da mesa (h_f) e altura total (h).

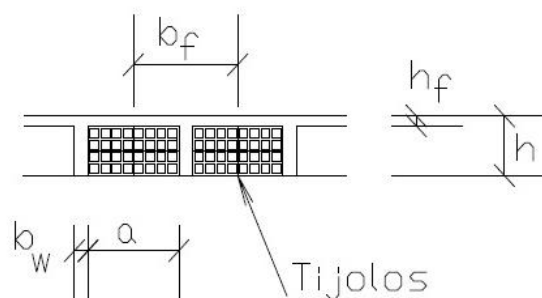


Figura 34 - Seção transversal de lajes nervuradas (ALBUQUERQUE, 1999)

Dentre as vantagens da Laje Nervurada, podem ser citadas:

- Redução do peso próprio que permite vencer maiores vãos;
- Redução no consumo de fôrmas (reaproveitamento dos caixotes);
- Menor consumo de concreto (PINHEIRO, 2007).

Dentre as desvantagens da Laje Nervurada, podem ser citadas:

- Aumento da altura da laje que acarreta em redução de pé direito;
- Dificuldade de compatibilizar os sistemas prediais.

A abertura de fissuras para Laje Nervurada é considerada da mesma forma já citada no item 2.1.1.

2.2.2 Modelo

Da mesma forma que a Solução Convencional, o modelo foi desenvolvido no software CAD/TQS partindo da solução obtida para a estrutura convencional. Novamente, foram utilizadas todas as disponibilidades do sistema computacional gráfico (concepção estrutural, análise de esforços solicitantes e flechas, dimensionamento e detalhamento de armaduras e emissão de plantas).

2.2.2.1 Pré-dimensionamento e Concepção Inicial

Serão ilustrados a seguir os procedimentos de pré-dimensionamento e concepção do sétimo pavimento (PT5) do edifício (quinto pavimento residencial). A arquitetura previa a disposição apresentada na Figura 11, sendo que isso foi tido como uma concepção inicial para o pré-dimensionamento. Para os demais pavimentos, os mesmos procedimentos foram adotados.

A partir da concepção inicial, são obtidos parâmetros que guiam o cálculo do pré-dimensionamento, como por exemplo, vãos, número de bordas engastadas, áreas de contribuição, etc.

O pré-dimensionamento das lajes nervuradas foi feito com base na Equação 7, Equação 8 e Equação 9.

Equação 7 - Altura da nervura

$$h_t = \frac{0,04(l_x + l_y)}{2}$$

h_t é a altura total da nervura (cm);

l_x é o menor vão da laje (cm);

l_y é o maior vão da laje (cm).

Equação 8 - Largura da nervura

$$b_w = 0,3h_t$$

b_w é a largura da nervura (cm);

Equação 9 - Vão efetivo da laje

$$1,5h_t < l_0 + b_w < 2h_t$$

l_0 é o vão efetivo da laje (cm).

Pré-dimensionando a Laje Nervurada para a situação de maiores vãos, ou seja, nas lajes L5, L8, L21 e L24 da Figura 11, são obtidos os valores presentes na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores obtidos no pré-dimensionamento da Laje Nervurada

l_x (cm)	600
l_y (cm)	800
h_t (cm)	28
b_w (cm)	8,4
$1,5h_t$ (cm)	42
$2h_t$ (cm)	56
l_0 mín (cm)	33,6
l_0 máx (cm)	47,6

Na biblioteca de lajes nervuradas do CAD/TQS, estão presentes seis fabricantes: Formplast, Atex, Xcol-Plastica, Cubetas Ulma, Astra e Brasil Fôrmas. Com base nos valores obtidos pelo pré-dimensionamento, foram selecionados modelos de cubetas da fabricante Atex, entre eles a Atex 660/26+5 (660 mm de espaçamento entre nervuras, 26 cm de altura de nervura e 5 cm de altura de capa, para todos os pavimentos, exceto o PT1) e ATEX660/26+10 (660 mm de espaçamento entre nervuras, 26 cm de altura de nervura e 10 cm de altura de capa, para o pavimento PT1) presentes no catálogo de dados técnicos da fabricante, representado na Figura 35.

ATEX 660

ALTURA DA FORMA	ESPESURA DA LÂMINA	ALTURA TOTAL	LARGURA DA NERVURA			ÁREA DA SEÇÃO	DISTÂNCIA DO C.G. à		INÉRCIA	MÓDULO DE FLEXÃO		VOLUME DO VAZIO		PESO PRÓPRIO	VOLUME DE CONCRETO
			INFERIOR	SUPERIOR	MÉDIA		FACE SUPERIOR	FACE INFERIOR		W_s	W_i				
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ²	cm	cm	cm ⁴	cm ³	cm ³	m ³	m ³ /m ²	kN/m ²	m ³ /m ²
16,0	5,0	21,0				546	6,5	14,5	18869	2885	1305			2,73	0,109
	7,5	23,5	12,0	15,0	13,5	711	7,2	16,3	26637	3684	1637	0,044	0,101	3,35	0,134
	10,0	26,0				876	8,1	17,9	36353	4471	2034			3,98	0,159
18,0	5,0	23,0				573	7,3	15,7	24678	3394	1569			2,90	0,116
	7,5	25,5	12,0	15,0	13,5	738	7,8	17,7	33992	4336	1925	0,050	0,114	3,53	0,141
	10,0	28,0				903	8,7	19,3	45220	5210	2341			4,15	0,166
21,0	5,0	26,0				637	8,5	17,5	36182	4277	2063			3,33	0,133
	7,5	28,5	12,0	17,2	14,6	802	9,0	19,5	48625	5427	2488	0,056	0,127	3,95	0,158
	10,0	31,0				967	9,7	21,3	62981	6480	2960			4,58	0,183
26,0	5,0	31,0				743	10,5	20,5	61721	5861	3015			4,00	0,160
	7,5	33,5	12,0	19,7	15,9	908	10,9	22,6	80525	7401	3560	0,065	0,150	4,63	0,185
	10,0	36,0				1073	11,5	24,5	101169	8782	4133			5,25	0,210
30,0	5,0	35,0				843	12,2	22,8	89505	7313	3933			4,63	0,185
	7,5	37,5	12,0	22,2	17,1	1008	12,5	25,0	114715	9155	4594	0,072	0,165	5,25	0,210
	10,0	40,0				1173	13,1	26,9	141746	10820	5269			5,88	0,235
d1	ds	D	bi	bs	br	A	rs	ri	I	Ws	Wi	V/V		Concreto 25 kN/m ³	

Figura 35 – Catálogo de dados técnicos da Atex

O restante do pré-dimensionamento de vigas e pilares é o mesmo presente no item 2.1.2.1.

Incêndio:

As dimensões mínimas de Laje Nervurada para o atendimento de situações de incêndio são apresentadas na Tabela 14 abaixo.

Tabela 14 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas biapoiadas (NBR15200:2004)

TRRF min	Nervuras Combinações de $b_{min}/c_1^{1)}$ mm/mm			Capa* $h/c_1^{2)}$ mm/mm
	1	2	3	
30	80/15			80/10
60	100/35	120/25	190/15	80/10
90	120/45	160/40	250/30	100/15
120	160/60	190/55	300/40	120/20

¹⁾ b_{min} corresponde à largura mínima da nervura.
²⁾ h corresponde à altura da laje.
 * Dimensões mínimas para garantir a função corta-fogo.

2.2.2.2 Carregamentos

Os carregamentos verticais e horizontais são os mesmos presentes no item 2.1.2.2.

2.2.2.3 Processamento e Estrutura Final

Durante o processamento, a estrutura com Laje Nervurada concebida inicialmente apresentava falhas em relação ao Estado Limite de Serviço, já que os

deslocamentos apresentavam valores excessivos. Assim, as medidas apresentadas a seguir foram tomadas para que tanto o Estado Limite Último e de Serviço fossem atendidos:

- Redução do comprimento de vigas em balanço (redução do balanço):

No pavimento Abrigo, as vigas em balanço V30, V36, V43, V49 e V45, representadas na Figura 36, tiveram os comprimentos reduzidos de 4,45 m para 2,45 m.

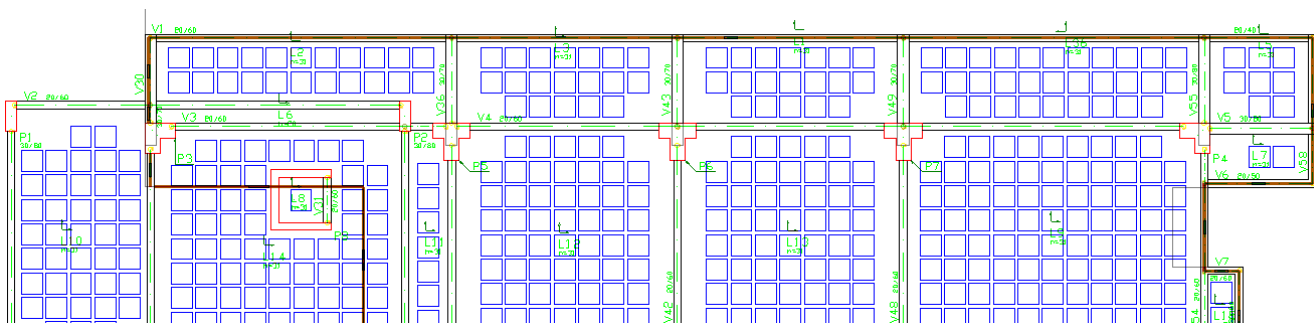


Figura 36 - Pavimento Abrigo, da Solução com Laje Nervurada, com vigas em balanço de menor comprimento

Da mesma forma, o pavimento PT1 também teve a redução do comprimento das vigas V28, V31, V38, V44 e V50, representadas na Figura 37, de 4,45m para 2,45 m.

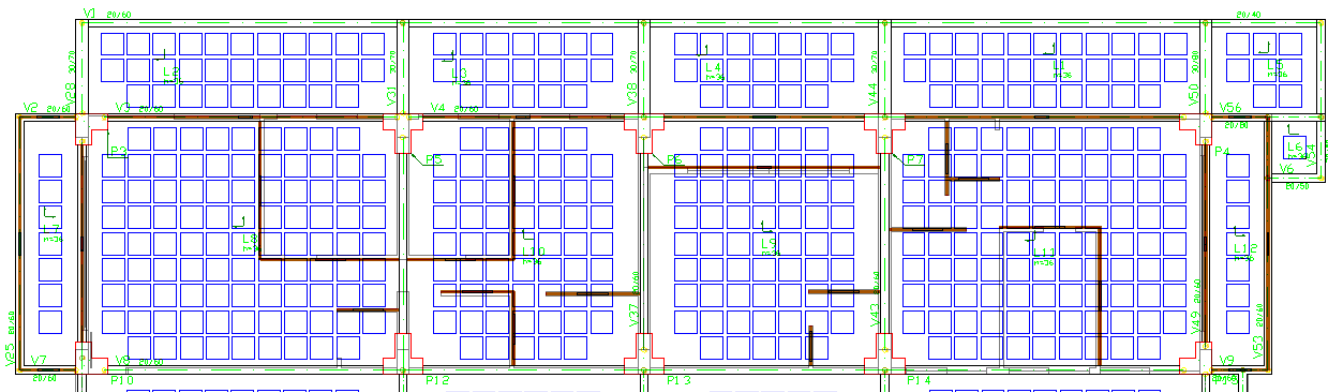


Figura 37 - Pavimento PT1, da Solução com Laje Nervurada, com as vigas em balanço de menor comprimento

A Figura 38 representa a região no modelo estrutural onde foram feitas as alterações citadas acima:

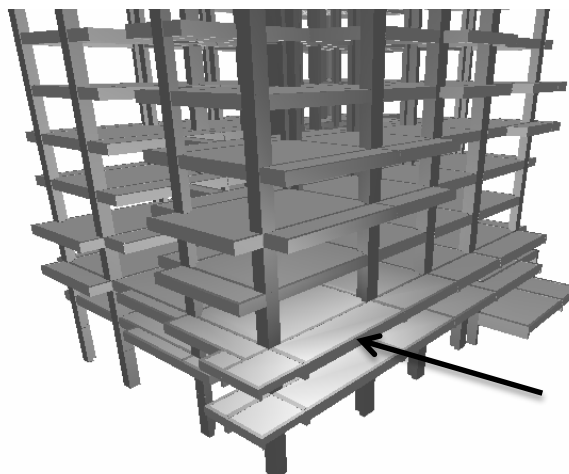


Figura 38 - Região do modelo estrutural, da Solução com Laje Nervurada, com vigas em balanço de menor comprimento

- Adição de vigas em balanço em varandas e extensões (redução de deslocamentos):

No pavimento Abrigo, foram adicionadas as vigas V59 e V60 em balanço, representadas na Figura 39, com seção transversal de 20 x 60 cm.

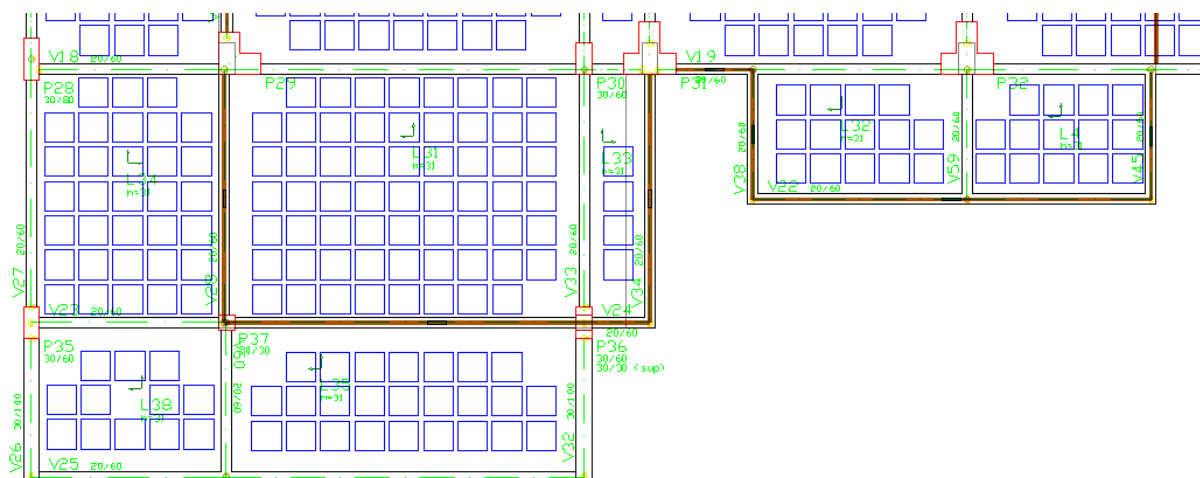


Figura 39 - Pavimento Abrigo, da Solução com Laje Nervurada, com novas vigas em balanço

O mesmo vale para o pavimento PT1, onde foi adicionada a viga V5 em balanço, representada na Figura 40, com seção transversal de 20 x 60 cm.

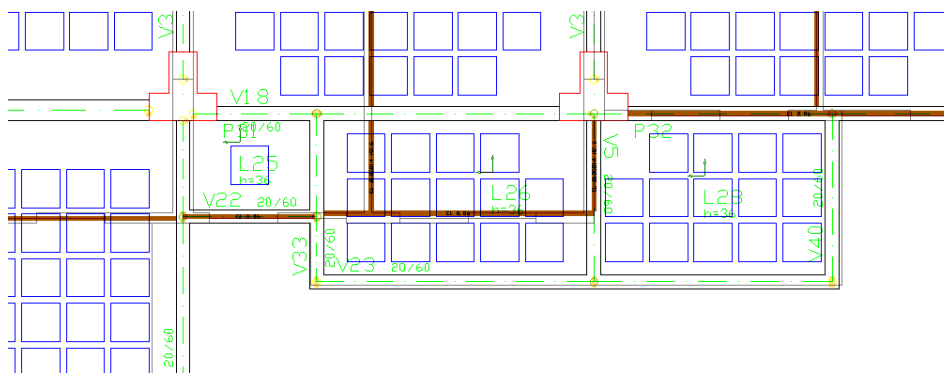


Figura 40 - Pavimento PT1, da Solução com Laje Nervurada, com nova viga em balanço

A Figura 41 representa a região no modelo estrutural onde foram feitas as alterações citadas acima:

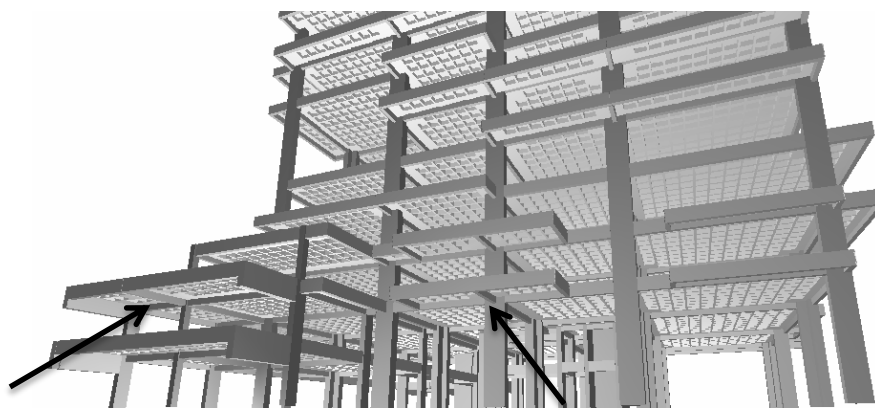


Figura 41 - Região do modelo estrutural, da Solução com Laje Nervurada, onde foram introduzidas novas vigas em balanço

- Retirada de cubetas em regiões próximas aos pilares e vigas:

Em todos os pavimentos, foram retiradas as cubetas em regiões próximas aos pilares e vigas, para que houvesse a seção cheia nesses locais. A Figura 42 representa a região do pilar P6, que se repete em todos os pavimentos.

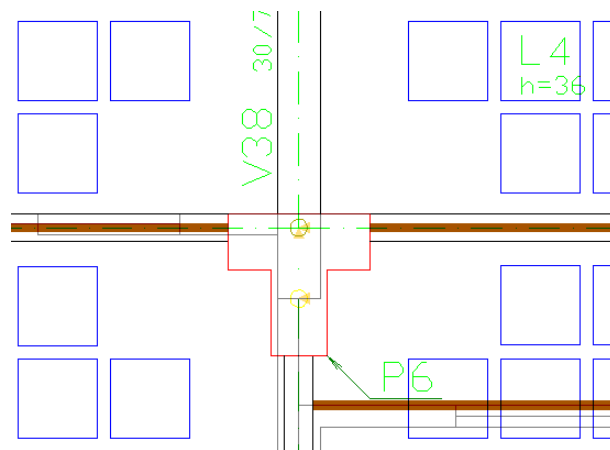


Figura 42 - Região do Pilar P6 da Solução com Laje Nervurada

A Figura 43 representa a região no modelo estrutural onde foram feitas as alterações citadas acima:

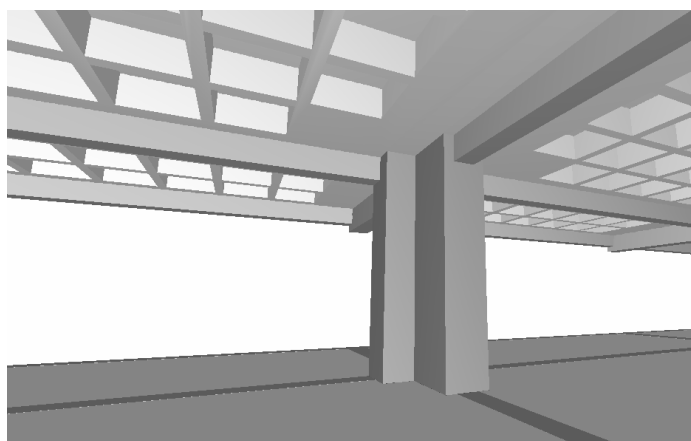


Figura 43 - Região próxima ao Pilar P6 no modelo estrutural da Solução com Laje Nervurada

Utilização de cubetas com menor consumo de material:

Durante o processamento, com base no software utilizado, foi verificado que as lajes “ATEX 660/26+5” e “ATEX 660/26+10” apresentavam baixo consumo de material e atendiam aos Estados Limites Último e de Serviço.

A laje “ATEX 660/26+10” foi utilizada apenas no pavimento PT1, pois este possui panos de laje com dimensões de 8 x 8 m, sendo superior àqueles 6 x 8 m comumente encontrados nos demais pavimentos do edifício. Com isso, para atender ao dimensionamento para flexão negativa, foi necessário adotar a capa de 10 cm nesta laje.

Com todas as medidas citadas nos itens acima, foi possível processar o modelo atendendo ao Estado Limites Último e de Serviço. Assim, são obtidos o modelo estrutural e concepção final. Na Figura 44 está representado o modelo estrutural em uma perspectiva inferior que permite enxergar as lajes nervuradas, na

Figura 45 o pavimento PT5 e na Figura 46 o pavimento Biblioteca, estes dois últimos sendo apenas exemplos da aplicação dos procedimentos de modelagem.

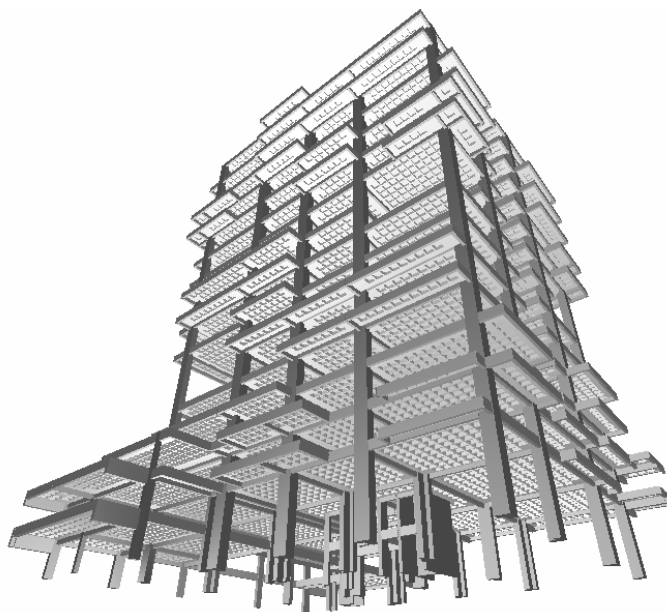


Figura 44 - Modelo estrutural da Solução com Laje Nervurada em perspectiva inferior

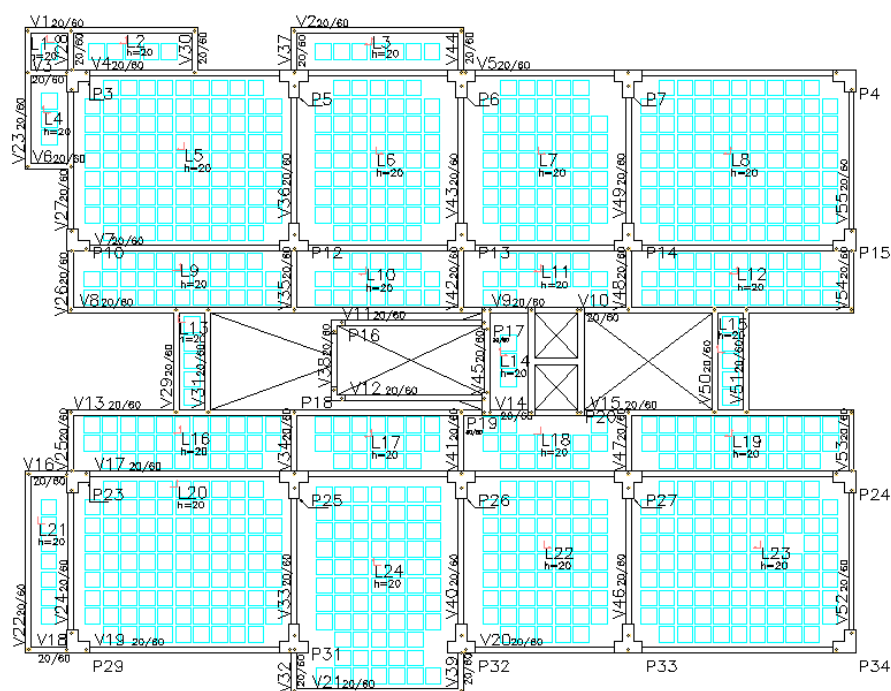


Figura 45 – Desenho de fôrmas com cubetas do Pavimento PT5 da Solução com Laje Nervurada

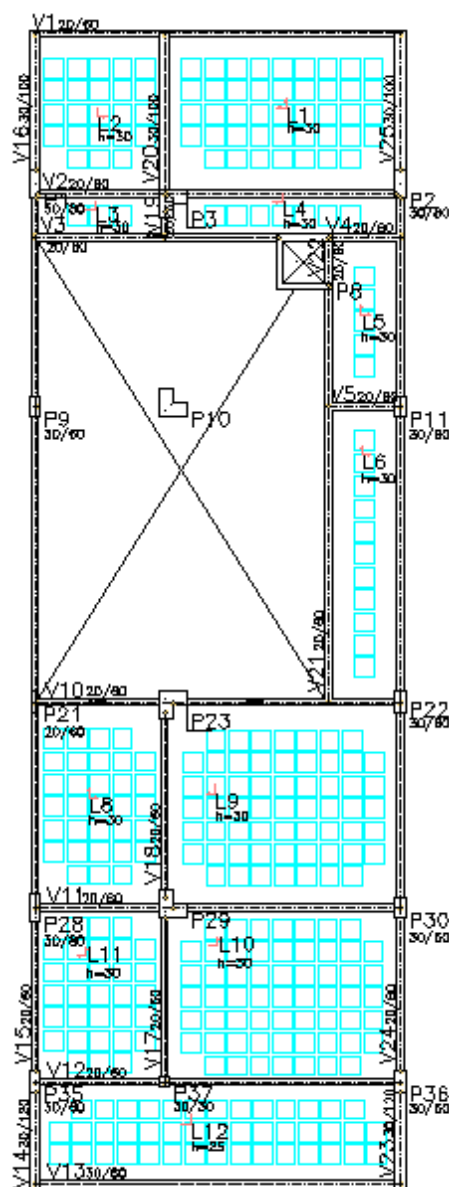


Figura 46 - Desenho de fôrmas com cubetas do pavimento Biblioteca da Solução com Laje Nervurada

2.2.2.4 Armaduras

O CAD/TQS processa o dimensionamento das armaduras segundo os critérios de norma. Como o presente estudo não visa um aprofundamento nos aspectos técnicos de detalhamento de armadura, em termos de ancoragem, transpasse, decalagem, etc; serão apresentados apenas trechos dos desenhos de armaduras dos elementos estruturais. Com base no dimensionamento e detalhamento produzido pelo software, são geradas as tabelas de consumo de aço que, juntamente com concreto e fôrmas, balizam a análise.

Considerando a região em balanço do pavimento Biblioteca, presente na Figura 46, as armaduras negativas verticais presentes nas lajes L10 ($h = 30$ cm), L11 ($h = 30$ cm) e L12 ($h = 25$ cm) são apresentadas na Figura 47.

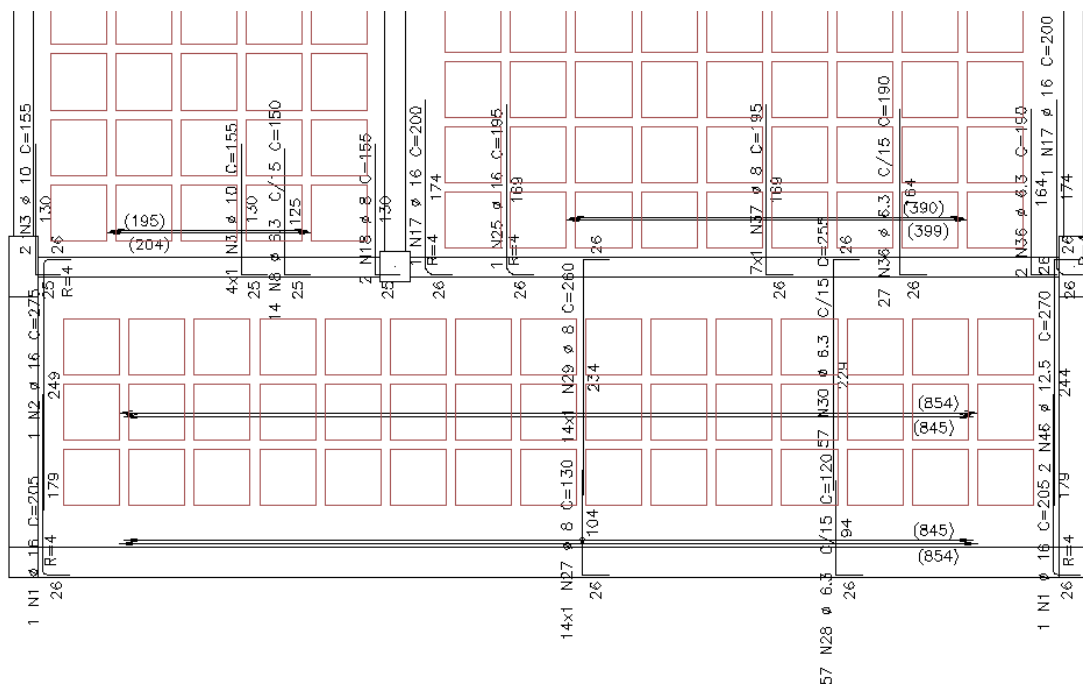


Figura 47 - Armaduras verticais negativas nas lajes L10, L11 e L12 do pavimento Biblioteca da Solução com Laje Nervurada

A viga V12 (20 x 60 cm), também presente na Figura 46, possui as armaduras dimensionadas na Figura 48.

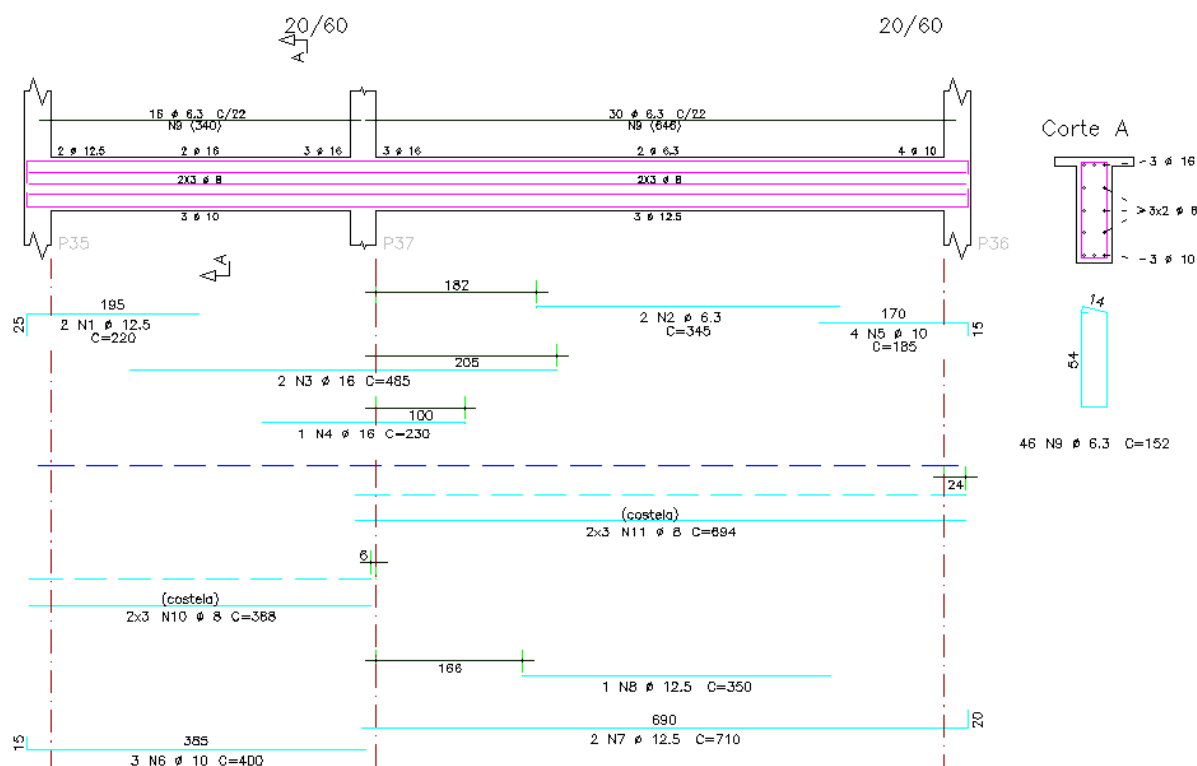


Figura 48 - Armaduras da viga V12 do pavimento Biblioteca da Solução com Laje Nervurada

O pilar P37 (30 x 30 cm), também presente na Figura 46, possui o mesmo dimensionamento de armadura da Solução Convencional. Isso se deve ao fato de em ambos os casos os carregamentos serem baixos, acarretando em armadura mínima. Assim, a Figura 30 do item 2.1.2.4 apresenta a mesma configuração de detalhamento de armaduras para o pilar P37.

2.2.3 Atendimento ao Desempenho

A. Flechas

Tabela 15 - Tabela referente à situação de flecha máxima, para a solução de Laje Nervurada

	LAJE NERVURADA			
	Laje	Flecha Máxima (cm)	Flecha Limite (cm)	Situação de flecha máxima em relação à flecha limite (%)
Elevador	2	0,2	1	20
PT14	5	1	2,2	45
PT13	19	1,2	2,3	52
PT12	6	1,2	2,2	55
PT11	24	2,1	2,2	95
PT10	22	2,1	2,3	91
PT9	27	1,9	2,3	83
PT8	29	1,9	2,3	83
PT7	1	1,9	3	63
PT6	11	1,7	2,3	74
PT5	11	1,7	2,3	74
PT4	2	1,9	1,9	100
PT3	14	1,1	2,2	50
PT2	19	1,2	2,8	43
PT1	15	1,6	2,9	55
Abrigo	35	1,8	3	60
Biblioteca	13	2,5	2,5	100
				67

Através das informações de flecha fornecidas pelo CAD/TQS e mostradas na Tabela 15, verifica-se que todos os pavimentos atendem ao estado limite de deformações excessivas (ELS-DEF) da NBR 6118.

Nota-se, entretanto, que a laje 13 da biblioteca e a laje 2 do pavimento 4 estão em situação de flecha limite, requisitando maior atenção. Ainda, percebe-se que a laje 2 do elevador se encontra na mesma situação que no cenário da laje maciça (Tabela 10), sugerindo também oportunidades de otimização a serem exploradas.

B. Abertura de Fissuras

Assim como para o cenário da laje maciça, ficou evidente também na Figura 49, Figura 50 e Figura 51, do pavimento PT1, que as estimativas de fissuras revelam ser menores que 0,3 mm, inferindo que o pavimento atende ao estado limite de formação de fissuras (ELS-W), como especificado no item 2.1.1.

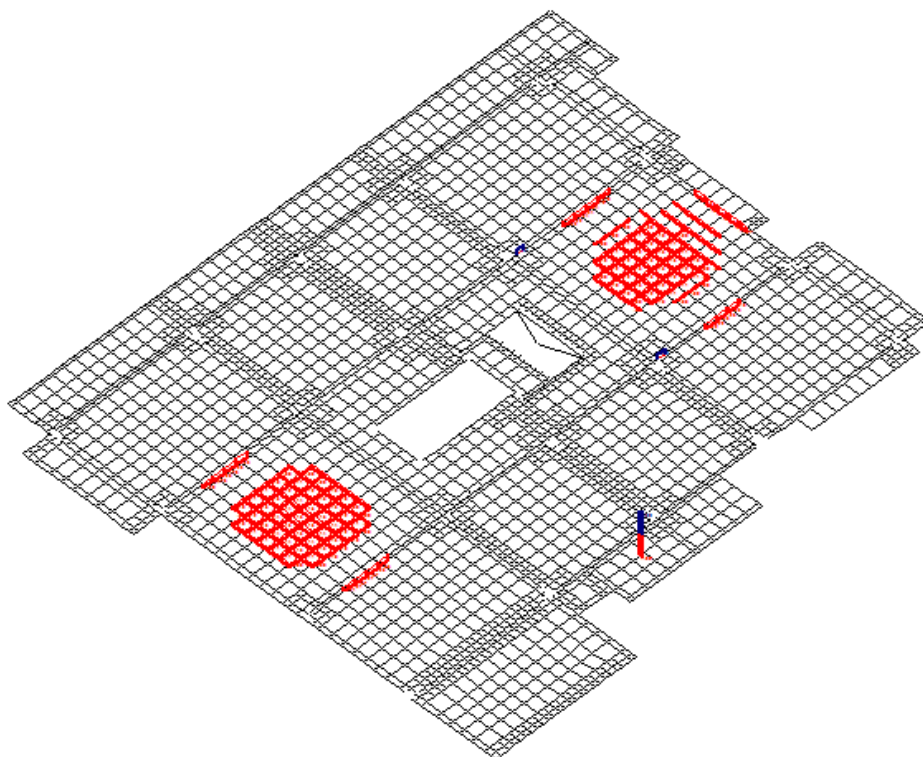


Figura 49 - Abertura de fissuras no pavimento PT1 na Solução de Laje Nervurada

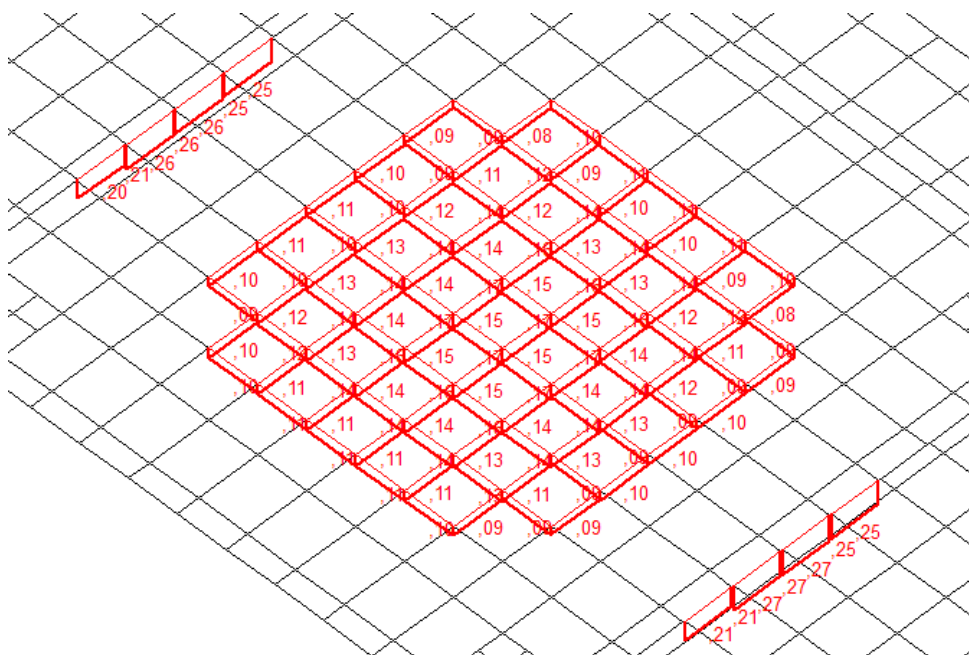


Figura 50 - Ampliação da abertura de fissuras no pavimento PT1 da Solução de Laje Nervurada com abertura máxima de 0,27 mm

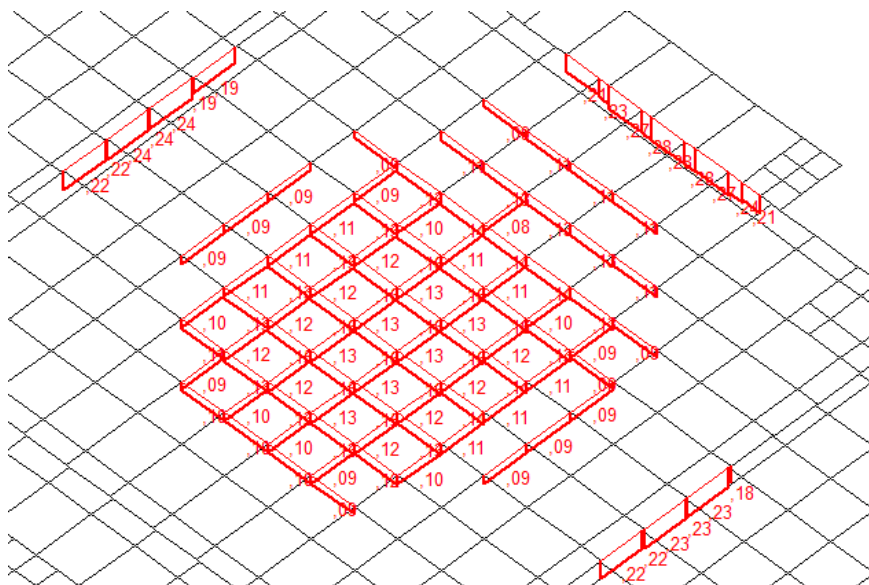


Figura 51 - Ampliação da abertura de fissuras no pavimento PT1 da Solução de Laje Nervurada com abertura máxima de 0,28 mm

2.2.4 Quantitativos

Além dos desenhos de fôrma e armadura obtidos, que são os produtos finais de um projeto, o CAD/TQS fornece tabelas de quantitativos. Nestas, estão presentes entre várias informações, os volumes de concreto em m³ (por elemento estrutural do pavimento), quantidade de fôrmas de madeira em m² (por elemento estrutural do pavimento) e quantidade de aço (por elemento estrutural do pavimento). A Tabela 16 apresenta estes valores.

Com posse dos quantitativos, é possível calcular taxas de consumo de armadura (kg/m³) e fôrma (m²/m³). A Tabela 17 apresenta estes valores. Esses dados são fundamentais para a análise posterior, visando uma obtenção de estimativas de custos para a estrutura e quantidade de trabalho.

Tabela 16 - Tabelas de Quantitativos para a solução com Laje Nervurada

Pavimento	Concreto (m³)				Fôrmas (m²)				Armadura (kg)			
	Pilares (m³)	Vigas (m³)	Lajes (m³)	Total (m³)	Pilares (m²)	Vigas (m²)	Lajes (m²)	Total (m²)	Pilares (kg)	Vigas (kg)	Lajes (kg)	Total (kg)
BIBLIOTECA	49,1	25,2	37,5	111,8	365,3	206,1	65,9	637,3	5676,5	1972,6	2645	10294,1
ABRIGO	43,8	48,4	127,3	219,5	326,2	375,5	199,5	901,2	1290,8	3998	8062,7	13351,5
PT1	37,1	39,7	145,4	222,2	258,7	292,7	178,8	730,2	2098,3	3455,6	7801,9	13355,8
PT2	41	31,6	79	151,6	283	275,8	113,7	672,5	2290,3	2645,7	5348,8	10284,8
PT3	41	35,2	83,2	159,4	283	306,7	125,1	714,8	2290,3	2932,3	5217,7	10440,3
PT4	41	34,2	80,8	156	283	296,6	132,9	712,5	2358	2923,1	5296	10577,1
PT5	41	33,8	79,1	153,9	283	290,8	114,7	688,5	2215,5	2835,6	4917,4	9968,5
PT6	41	33,6	77,6	152,2	283	285,3	124,4	692,7	2358	3041,4	5130,1	10529,5
PT7	41	32,2	75,8	149	283	277,9	115,3	676,2	2283,2	2622,2	5147,2	10052,6
PT8	41	38,4	86,9	166,3	283	326	137,9	746,9	2215,5	3136,8	5330,1	10682,4
PT9	41	36,4	86,8	164,2	283	308,4	141,5	732,9	2290,3	3510,8	5685,2	11486,3
PT10	41	33,3	79,2	153,5	283	296,2	114,5	693,7	2290,3	2704,2	5016,4	10010,9
PT11	41	35,7	80,5	157,2	283	313,5	131,9	728,4	2258	2824,3	5362,8	10445,1
PT12	41	34,2	84	159,2	283	292,9	461,4	1037,3	2215,5	2754,6	5369,8	10339,9
PT13	41	34,9	85,5	161,4	283	302,2	133,2	718,4	2230,9	2666,7	5578,3	10475,9
COBERTURA	28,5	13,1	30,7	72,3	202,4	117,4	47,3	367,1	1520,3	955,2	2038,3	4513,8
ELEVADOR	3,7	2,4	4,8	10,9	33	20,8	11,1	64,9	208,3	177,2	423,8	809,3
TOTAL	654,2	542,3	1324,1	2520,6	4581,6	4584,8	2349,0	11515,4	38090,0	45156,3	84371,5	167617,8

Tabela 17 - Tabela de taxas de consumo da estrutura para a solução com Laje Nervurada

Pavimento	Taxas		
	Consumo de Armaduras (kg/m³)	Consumo de Fôrmas (m²/m³)	Consumo de Cubetas (unid./pavimento)
BIBLIOTECA	92,08	5,70	352
ABRIGO	60,83	4,11	1307
PT1	60,11	3,29	1152
PT2	67,84	4,44	876
PT3	65,50	4,48	888
PT4	67,80	4,57	792
PT5	64,77	4,47	871
PT6	69,18	4,55	781
PT7	67,47	4,54	801
PT8	64,24	4,49	884
PT9	69,95	4,46	858
PT10	65,22	4,52	875
PT11	66,44	4,63	793
PT12	64,95	6,52	870
PT13	64,91	4,45	884
COBERTURA	62,43	5,08	322
ELEVADOR	74,25	5,95	28
MÉDIA	67,5	4,7	784,4

2.3 Comparação de Desempenho

Abordagem:

A análise do desempenho de uma estrutura depende de certos fatores e deve ser feita com base em alguns requisitos.

Para exercício desta análise, foram encontrados alguns desafios ao longo do caminho da definição de uma metodologia de avaliação. Foram estes:

I. Percepção desordenada, indelineável e sem definição lógica de causa e consequência entre os inúmeros aspectos relativos a desempenho estrutural mencionados nas normas técnicas.

II. Ausência de informações a respeito de alguns fatores influenciadores do desempenho (como de certas particularidades do ambiente, do material, da execução, e da manutenção), impedindo de qualificar, de forma aprofundada e detalhada, os indicadores de desempenho, e, portanto, de realizar uma avaliação abrangente acerca do desempenho da estrutura.

III. Limitação e complicação do software utilizado (TQS), no que diz respeito à apresentação das estimativas de flechas e de fissuras, como ausência de lista completa dos resultados, individualizados por laje (apesar de o software verificar os requisitos de ELS-DEF e ELS-W exigidos pela norma).

As soluções para estes três desafios encontrados foram, respectivamente:

I. Reorganizar e estruturar as informações trazidas pelas NBR 6118 e NBR 15575, de forma a explicitar uma sequência lógica entre as informações apresentadas (fatores influenciadores vs. indicadores do desempenho) e classificá-las em áreas mutuamente exclusivas (sem sobreposição entre estas) e coletivamente exaustivas (tentativa de incorporar todas as informações presentes). O resultado está apresentado na Figura 52.



Figura 52 - Metodologia utilizada para análise do desempenho

II. Evidenciar quais, dentre os fatores influenciadores apresentados, estão dentro de nosso alcance (se possuímos ou não alguma informação a respeito), para então poder identificar quais indicadores poderiam ser determinados. Então, definir quais destes indicadores especificados serão utilizados para qualificar o desempenho, tanto por disposição de informação, quanto por relevância em termos de efeitos comparativos, considerando o escopo deste trabalho.

III. Analisar, de forma discreta, partes da estrutura, sem aferição de uma conclusão abrangente da estrutura como um todo.

Análise:

A. Conforto Visual

O aumento de espessura da laje maciça para a Laje Nervurada reduz a altura útil do pavimento PTI em 16 cm, e dos demais pavimentos em 11 cm (exceto no pavimento da biblioteca, onde tal mudança é desprezível). Desta forma, essas alterações reduzem o conforto do usuário.

Como alternativa, pode-se aumentar o pé-direito dos pavimentos em 10 cm, como forma de compensação desta altura perdida (lembrando que esse aumento implicaria em intensificação das cargas de peso próprio, assim como um maior volume de material consumido). Tal intervenção não foi introduzida no dimensionamento desta estrutura para não se interferir no gabarito previamente estabelecido.

Ainda no caso da Laje Nervurada, a adição de vigas em balanço no abrigo e no PT1 interfere na percepção visual de quem está localizado na biblioteca e no abrigo, respectivamente. Entretanto, tal alteração não implica em uma mudança necessariamente negativa.

Além disso, caso não se opte pela introdução do forro, esta laje, em termos gerais, oferece estética desagradável para os pisos localizados imediatamente abaixo desta.

B. Segurança à Incêndio

Solução Convencional:

Para fins de análise de resistência ao fogo, deve-se determinar o tempo requerido de resistência ao fogo do edifício (TRRF), pela NBR 14432 de 2001, e o tempo equivalente (TE), pela NBR 15200 de 2012, para que, através da mesma norma (NBR 15200 de 2012), sejam determinadas as dimensões mínimas da laje.

Como não se tem os dados necessários relativos à arquitetura para cálculo do TE, definiremos as dimensões mínimas apenas pelo TRRF, como especificado na norma NBR 15200 de 2004 (não reduzido).

O método tabular estabelece o TRRF em função do uso e das dimensões da edificação, sendo esta a medida entre as cotas do piso térreo e do piso do último pavimento.

$$\text{Assim: } h = (\text{número de pavimentos} - 1) \times (\text{pé} - \text{direito dos pavimentos})$$

$$\text{Chegando a: } h = (17 - 1) \times 2,8 = 44,8 \text{ m}$$

Ainda, a tabela B1 da NBR 14432:2001, o edifício pertence ao grupo A (residencial) e subgrupo A2 (habitações multifamiliares). Da tabela A1, os edifícios de grupo A com altura $h \geq 30 \text{ m}$ pertencem ao grupo P5 de resistência ao fogo e devem atender ao TRRF = 120 min.

Assim, através da tabela 4 da NBR 15200:2004 (dimensões mínimas para lajes apoiadas em vigas e para lajes nervuradas, respectivamente), conclui-se que a altura mínima da laje é de 120 mm e seu cobrimento mínimo é 25 mm.

Comparando com os valores utilizados no dimensionamento da estrutura desenvolvido na seção 2.1.2.3 acima, conclui-se que a estrutura calculada atende aos requisitos de resistência ao fogo.

Solução de Laje Nervurada:

Neste cenário, as dimensões e o uso do edifício permanecem os mesmos que no cenário da Solução Convencional, e portanto o TRRF não se altera (120 min).

Dessa forma, através da tabela 6 da NBR 15200:2004, conclui-se que a largura mínima da nervura na seção média é de 160 mm, o cobrimento de 60 mm e a altura da capa de 120 mm.

Comparando com os valores utilizados da laje ATEX, mostrados na seção 2.2, conclui-se que a estrutura calculada não atende aos requisitos de resistência ao fogo.

Vale ressaltar que o cobrimento mínimo exigido pela norma aparenta, em primeira instância, ser bastante elevado (60 mm), devendo-se averiguar a fundo as circunstâncias que implicam neste valor.

Comparação:

Dessa forma, conclui-se que a Solução Convencional apresenta maior resistência ao fogo em relação à nervurada, possivelmente pelo fato da relação superfície sobre volume do segundo caso ser mais elevado, o que implicaria numa propagação mais rápida do fogo.

No entanto, esta diferença é mínima e varia a cada caso, devendo ser comprovada por meio de ensaios.

C. Funcionalidade

No caso da Laje Nervurada, a redução em 2m do comprimento das vigas em balanço nos pavimentos Abrigo e PT1 se traduz em alterações estruturais negativas, do ponto de vista funcional. Tal medida reduz a área útil no pavimento Abrigo em 62,24 m². Segue comentário do autor do projeto, Luiz Felipe Sakata, sobre as medidas adotadas:

“A integração entre a engenharia e a arquitetura é extremamente importante no âmbito do projeto na construção civil, as quais as duas esferas devem estar em sintonia para que o produto final saia como desejado. Foi o caso do projeto habitacional do Estúdio Gravataí, onde a equipe de engenharia permitiu que a estrutura fosse dimensionada e concluída sem aumentar demais as seções dos pilares e vigas do sistema, minimizando ao máximo os impactos e interferências visuais e espaciais no projeto. A mudança no vão da biblioteca em nada alterou seu programa e função, visto que o foyer de entrada já era um local amplo, e a ampliação da viga não interferiu diretamente na qualidade do espaço. Por outro lado, a diminuição de 2 metros no balanço do piso do abrigo reduziu a área útil em mais de 60 metros quadrados impactando diretamente o uso do local. No entanto, o projeto original previa uma área de circulação e convivência maior do que a prevista no programa de usos e, portanto, as áreas afetadas podem ser facilmente realocadas e redimensionadas, sem grandes prejuízos aos futuros usuários.”

D. Limitação de Flechas

A Tabela 18 mostra, para cada solução, a relação flecha máxima sobre flecha limite de cada pavimento, ilustrada em um gráfico de barras. Esta relação expressa, para cada laje, seu fator de segurança no que se refere a deslocamento. Já a tabela situada à direita mostra a variação entre estas duas situações, como forma de evidenciar quais são os pavimentos em que ocorre a maior diferença de desempenho entre as soluções.

Tabela 18 - Tabelas referentes às situações de flecha máxima, para as duas soluções

LAJE MACIÇA					LAJE NERVURADA					Variação entre as situações de flecha máxima relativa (pp)	
	Laje	Flecha Máxima (cm)	Flecha Limite (cm)	Situação de flecha máxima em relação à flecha limite (%)		Laje	Flecha Máxima (cm)	Flecha Limite (cm)	Situação de flecha máxima em relação à flecha limite (%)		
Elevador	2	0,2	1	20	Elevador	2	0,2	1	20	Elevador	0
PT14	5	1,5	2,2	68	PT14	5	1	2,2	45	PT14	23
PT13	6	1,4	2,3	61	PT13	19	1,2	2,3	52	PT13	9
PT12	6	1,6	1,7	94	PT12	6	1,2	2,2	55	PT12	40
PT11	21	1,4	2,2	64	PT11	24	2,1	2,2	95	PT11	32
PT10	1	1,4	2,3	61	PT10	22	2,1	2,3	91	PT10	30
PT9	4	1,6	1,6	100	PT9	27	1,9	2,3	83	PT9	17
PT8	11	1,2	2,3	52	PT8	29	1,9	2,3	83	PT8	30
PT7	20	1,6	3	53	PT7	1	1,9	3	63	PT7	10
PT6	13	1,5	2,3	65	PT6	11	1,7	2,3	74	PT6	9
PT5	8	1,1	2,3	48	PT5	11	1,7	2,3	74	PT5	26
PT4	23	1,7	1,8	94	PT4	2	1,9	1,9	100	PT4	6
PT3	21	1,2	2,2	55	PT3	14	1,1	2,2	50	PT3	5
PT2	19	1,8	3	60	PT2	19	1,2	2,8	43	PT2	17
PT1	5	2,9	3	97	PT1	15	1,6	2,9	55	PT1	41
Abrigo	5	2,7	3	90	Abrigo	35	1,8	3	60	Abrigo	30
Biblioteca	1	1,8	2,3	78	Biblioteca	13	2,5	2,5	100	Biblioteca	22
				68					67	Total	1

Como exemplo, o pavimento PT14, no cenário de laje maciça e em situação de flecha máxima, exerce 68% de seu deslocamento máximo permitido pela NBR 6118. Já o mesmo pavimento, no cenário de Laje Nervurada e em situação de flecha máxima, atinge 45% do valor de seu deslocamento limite. Assim, para o pavimento PT14, existe uma redução de 23 pontos percentuais entre o resultado da laje maciça para a Laje Nervurada, como indicado pela Tabela 18 à direita.

Vale ressaltar que esta análise não é representativa do pavimento como um todo. Foi realizada apenas uma avaliação do pior caso para cada pavimento (flecha máxima do pavimento). E, ainda, não foram utilizadas as mesmas lajes como base de comparação entre as soluções, uma vez que a flecha máxima de um pavimento para certo cenário não ocorre necessariamente na mesma laje deste determinado pavimento para o outro cenário.

Assim, delimitando esta análise à base amostral obtida, verifica-se que, em média, as duas soluções apresentam aproximadamente a mesma margem de solicitação/resistência, no que diz respeito a deslocamentos (apenas 1 ponto percentual de variação entre elas). Porém, discretizando o edifício em pavimentos, percebe-se que há grandes diferenças entre os dois cenários, principalmente nos pavimentos PT1 e PT12, com variações atingindo 41 pontos percentuais no pavimento 1.

E. Abertura de Fissuras

No pavimento PT1 analisado, as estimativas de fissuras abertas na Laje Nervurada demonstraram ser, em geral, maiores do que na laje maciça, tanto em quantidade, quanto em intensidade, chegando a apresentar valores de até 0,28 mm (próximo de seu limite máximo de 0,3 mm).

Como citado anteriormente, esta análise diz respeito a um pavimento isolado. Para efeitos comparativos de desempenho à fissuração entre as duas soluções, deve-se promover a continuação e aprofundamento deste estudo, para todos os pavimentos do edifício.

F. Considerações a respeito dos fatores desconsiderados

- Segurança estrutural: desconsiderada posto que o software CAD/TQS segue o método semi-probabilístico citado na NBR 6118 para efeitos de dimensionamento, ou seja, $R_d \geq S_d$ em todos os elementos da estrutura.
- Desempenho térmico: partindo do mesmo pressuposto da segurança a incêndio (relação superfície/volume maior), a laje nervurada apresentaria piores resultados em relação ao desempenho térmico. No entanto, assim como para avaliação de resistência ao fogo, eventuais ensaios devem ser realizados para uma conclusão correta a respeito desse parâmetro, visto que depende essencialmente da geometria adotada para cada caso.
- Desempenho acústico: de maneira geral, as lajes nervuradas possuem um bom desempenho acústico e não deixam a desejar em relação às lajes maciças, de acordo com o “Estudo de tipologias de lajes quanto ao isolamento ao ruído de impacto”, de Daniel Pereyron (arquiteto e urbanista). Entretanto, como este, assim como o desempenho térmico, depende essencialmente da geometria adotada, devem ser realizados ensaios para uma correta comparação entre as duas.
- Ações dinâmicas: desconsideradas todas as observações referentes às cargas cíclicas, uma vez que estas se mostram significativas apenas em projetos de caráter mais dinâmico.
- Corrosão do aço: desconsiderada por depender essencialmente da fissuração, do ambiente, da qualidade e do cobrimento do concreto. Como não se obteve conclusão abrangente acerca da fissuração do edifício como um todo, e não se obteriam resultados comparativos em função dos outros três fatores, não se fez suposições a respeito da corrosão.
- Envelhecimento e deterioração: desconsiderados pois dependem de certas características do ambiente, material e execução, não tratadas neste trabalho.
- Drenagem: desconsiderada por motivos de relevância e por falta de detalhamento aprofundado da arquitetura.

G. Considerações finais

As conclusões geradas sobre flecha e fissura não são representativas o bastante para se obter uma decisão geral a respeito de qual das soluções possui o melhor desempenho em serviço. Isso, pelo fato de terem sido analisadas apenas para uma específica laje ou pavimento, carecendo de um entendimento geral do edifício como um todo.

A laje nervurada demonstrou ser a pior solução em termos de funcionalidade e de conforto visual, com área e volume útil reduzidos, em função de adição de vigas e aumento de altura das lajes, respectivamente.

Já em relação à resistência ao fogo, a solução estrutural de laje nervurada apresentou uma performance inferior à convencional, sugerindo também um pior desempenho térmico.

3. Custos

3.1 Revisão Bibliográfica

A definição dos custos de uma determinada solução estrutural é, na prática, muito complexa, uma vez que envolve e tem relação com todas as demais áreas de projeto. Depende, entre outros, do consumo de material, da mão de obra, de equipamentos adotados e do prazo estabelecido.

A área de gerenciamento de custos em quaisquer projetos, segundo o PMBoK (Project Management Body of Knowledge), uma padronização que identifica e conceitua processos, áreas de conhecimento, ferramentas e técnicas, deve envolver quatro etapas diferentes, sendo estas: planejar o gerenciamento dos custos, que define quais processos serão utilizados nas próximas etapas; estimar custos; definir o orçamento; e controlar custos, o que envolve o acompanhamento destes durante a execução.

O presente trabalho, no entanto, irá se ater à estimativa de custos e à elaboração de um orçamento básico. A primeira é feita previamente, a partir do projeto arquitetônico, antes de qualquer estudo de estruturas, e permite uma noção geral de quanto será dispendido com a execução de um empreendimento, quando ainda faltam dados para melhor aprofundamento. Uma estimativa, portanto, pode ser definida como a “predição do custo de um projeto, de acordo com um determinado escopo documentado, a ser realizado numa localização definida e num tempo futuro” (AACE, Recommended Practice R10S-90, Cost Engineering Terminology). Já a segunda, a elaboração do orçamento, é realizada a partir do projeto estrutural, sua modelagem e dimensionamento, e consiste em um cálculo determinístico dos custos da obra, baseado em quantitativos de consumo e preços de materiais, obtidos em fontes de referência.

Para ambos, porém, é necessária uma caracterização breve do edifício em estudo. Resumidamente, trata-se de um edifício residencial, multifamiliar, de investimento particular, médio padrão (possuindo 15 pavimentos residenciais e 2 elevadores) e acabamento médio, localizado próximo ao centro da cidade de São Paulo. Segue-se então a metodologia e os dados utilizados para cada tipo de análise.

3.1.1 Estimativa

A estimativa inicial de custos deverá ser feita de forma paramétrica, com base no tipo de empreendimento que está sendo estudado e em índices que propõem relações de preço por metro quadrado de área construída, permitindo que se estime previamente a margem de custos dentro da qual deverá estar a construção da obra. Destes, os mais utilizados atualmente são o Custo Unitário Básico (CUB), produzido pelos Sindicatos da Indústria da Construção Civil (SindusCon) de cada estado brasileiro e o Custo Unitário PINI de Edificações (CUPE), produzido pelo Departamento de Engenharia e Custos da PINI. Para maiores esclarecimentos, convém uma breve explicação dos órgãos responsáveis pela elaboração de tais índices.

Os SindusCon (Sindicatos da Indústria de Construção Civil) são órgãos regionais constituídos para fins de estudo, informação, proteção e representação legal da categoria econômica da Indústria da Construção Civil, com o intuito de colaborar com empresas particulares atuantes na área e poder público, atendendo às suas necessidades e da sociedade como um todo. É ainda função dos sindicatos produzir, divulgar e distribuir revistas e outros conteúdos informativos de interesse da construção civil, como o Custo Unitário Básico.

A PINI é uma empresa de informação voltada para a indústria da construção civil, que objetiva atender às necessidades de empresas e profissionais da área, atuando nos segmentos de Mídia, Educação, Sistemas, Dados e Consultoria. Visa, por meio dos fundamentos da engenharia de custos, proporcionar ganhos e benefícios técnicos e econômicos tanto para clientes como para empresas, auxiliando-os no controle de custos de seus empreendimentos, na valoração de obras já executadas e na elaboração e manutenção de banco de dados de preços de serviços de construção civil. É responsável pela publicação da TCPO (Tabela de Composição de Custos para Orçamento), além da Revista Construção Mercado, que fornece a pesquisa de preços de diversos materiais e divulga índices como o CUPE e o Índice PINI de Custos de Edificações.

- CUBE – Custos Unitários Básicos de Edificações

O Custo Unitário Básico (CUB) está estabelecido no item 3.9 da Norma Brasileira ABNT NBR 12.721:2006, e objetiva servir de base para avaliação de parte dos custos de construção das edificações. É divulgado mensalmente pelos Sindicatos da Indústria da Construção Civil (SindusCon) regionais, com o objetivo básico de disciplinar o mercado de incorporação imobiliária, servindo como parâmetro na determinação dos custos dos imóveis. Devido à sua alta credibilidade, atualmente ainda é utilizado como indicador macroeconômico dos custos do setor.

Os valores variam de acordo com itens como tipo de uso do imóvel (residencial, comercial, industrial), padrão da construção (popular, médio ou alto padrão) e número de pavimentos. O CUB/m², porém, representa o custo parcial da obra, isto é, não leva em conta os demais custos adicionais, como valores de terrenos, fundações especiais, ar-condicionado, impostos e taxas, remuneração do construtor e o lucro do projeto, entre outros. Estes são considerados apenas em uma fase posterior do projeto, após ter sido considerado economicamente viável, quando se dispõe de maiores detalhes sobre o mesmo.

Segue a Tabela 19 referente ao mês de maio de 2016, no Estado de São Paulo, com valores expressos em R\$/m²:

Tabela 19 - Custos Unitários Básicos (SINDUSCON-SP, 2016)

Unidade Autônoma	Pav.	Baixo	Normal	Alto
Residência unifamiliar	1	1223,07	1506,93	1804,81
Residência multifamiliar	8	1065,86	1234,38	1447,13
	16	-	1197,13	1552,51
Prédio popular	4	1120,66	1415,19	-
Comercial - andares livres	8	-	1419,21	1505,39
Comercial - salas e lojas	8	-	1229,22	1328,25
	16	-	1636,43	1766,14
Galpão industrial	1	-	694,85	-
Projeto de interesse social	4	833,98	-	-
Residência popular	1	1343,92	-	-

- Custos Unitários PINI de Edificações

O Custo Unitário PINI de Edificações (CUPE), é outro indicador de referência para esse tipo de estimativa. O cálculo mensal dos Custos Unitários PINI de Edificações é realizado por meio da atualização do orçamento global do projeto padrão de cada tipo de obra, renovando os preços de todos os insumos que participam do cálculo, entre materiais, mão de obra e equipamentos. Vale ressaltar, sobre o indicador que:

- Estão aplicadas Taxas de Leis Sociais e Risco do Trabalho 129,34% – para as regiões de São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo – e 127,95% para as demais regiões.
- Não estão considerados itens que devem ser orçados conforme o projeto:
 - Taxa de BDI (Benefício e Despesas Indiretas);
 - Projetos cópias, orçamentos, emolumentos, administração local da obra, serviços de proteção coletiva, movimentos de terra, fundações especiais, ar-condicionado, aquecedores e paisagismo.

Na etapa de infraestrutura foram considerados somente os serviços referentes à execução de vigas baldrame, travamentos e blocos de apoio.

Dentre as tipologias definidas pelo CUPE, segmentadas segundo tipos de construção e padrões de acabamento, aquela na qual o edifício do presente trabalho melhor se enquadrou, por semelhança em área, padrão e número de pavimentos foi: “Edifício Residencial de 19 pavimentos (7.373,66 m²), executado com alvenaria de blocos de concreto, caixilhos de alumínio, fachada com argamassa, pintura látex e textura e laje com cobertura de telha em fibrocimento”.

Segue a Tabela 20, referente ao mês de maio de 2016, no Estado de São Paulo, com valores expressos em R\$/m²:

Tabela 20 - Custos Unitários PINI de Edificações (PINI, 2016)

Uso de Edificação	Custo Total	Material	Mão-de-obra
Habitacional			
Residencial fino (1)	2.053,36	1.189,90	863,46
Residencial médio (2)	1.546,64	810,87	735,77
Residencial popular (3)	1.170,07	622,53	547,54
Sobrado popular (11)	1.353,85	701,69	652,16
Prédio com elevador fino (4)	1.628,23	952,46	675,77
Prédio com elevador padrão médio alto (12)	1.435,64	894,09	541,55
Prédio com elevador médio (10)	1.391,74	771,20	620,54
Prédio sem elevador médio (5)	1.587,04	760,06	826,98
Prédio sem elevador popular (6)	1.163,81	541,76	622,05
Comercial			
Prédio com elevador fino (7)	1.712,79	1.039,72	673,07
Prédio sem elevador médio (8)	1.708,76	914,44	794,33
Clinica Veterinária (14)	1.576,64	920,51	656,13
Industrial			
Galpão de uso geral médio (9)	1.456,62	995,72	460,89

Pelo fato de a estimativa de custos depender somente das características tipológicas da edificação e não necessariamente do sistema estrutural adotado, esta estimativa inicial de custo é válida para ambas as soluções. Para isso serão utilizadas as áreas medidas no projeto arquitetônico, por meio do software AutoCAD, para o cálculo da área total construída e multiplicação desta pelos índices Custo Unitário Básico (CUB) e Custos Unitários PINI de Edificações (CUPE), já abordados.

Segue a Tabela 21 de áreas segundo projeto:

Tabela 21 – Quadro resumo de áreas do projeto arquitetônico obtido a partir do software AutoCAD

Quadro Resumo de Áreas	
Pavimento	Área de laje (m²)
Abrigo	744,0
1	687,5
2	555,1
3	576,7
4	544,9
5	560,8
6	520,3
7	526,4
8	596,7
9	573,2
10	559,7
11	545,6
12	575,0
13	607,1
Total	8173,0

Após a multiplicação dos índices, encontram-se na Tabela 22 os valores encontrados:

Tabela 22 - Custos totais da obra baseados em índices PINI e SindusCon

Índices (mai/16)	PINI			SindusCon - SP
	CUPE			CUBE
	Prédio com Elevador Médio			Res. Multifam. 16 Pav. Padrão Normal
	Material	Mão de Obra	Global	Global (mai/16)
R\$	6.204.517,77	4.621.820,19	10.826.337,96	9.786.898,36

3.1.2 Orçamento

Esta etapa consiste basicamente em estimar os gastos principais com a estrutura concebida, por meio da multiplicação do consumo de materiais por seus preços unitários, a fim de se obter uma aproximação razoável não do custo total e detalhado da obra, englobando todos os seus elementos, mas do impacto econômico da escolha estrutural nos custos de execução do edifício.

Os valores adotados para tanto referem-se à média praticada pelo mercado na região do Estado de São Paulo e estão reunidos na seção de Índices e Custos da Revista Construção (PINI, Maio - 2016), que expõe estimativas com base em pesquisas de preços realizadas mensalmente, com fechamento no mês anterior à edição utilizada.

Uma vez que o orçamento será utilizado como forma de avaliação da qualidade de uma alternativa estrutural, para efeito de análises do projeto em questão, serão adotadas algumas hipóteses simplificadoras:

- O orçamento será baseado nos quantitativos iniciais de consumo obtidos na modelagem do projeto feita previamente através do software CAD/TQS.
- Os custos orçados serão referentes apenas aos materiais envolvidos na execução dos elementos estruturais (laje, viga e pilar), uma vez que se pretende analisar a qualidade econômica da solução estrutural.
- Os materiais cujos preços foram cotados são:
 - **Concreto Bombeável dosado em central, 25MPa, Brita 1.** Devido à dimensão do edifício, o uso de concreto convencional torna-se inviável. Foi adotado o mesmo concreto para todos os elementos.

- **Fôrmas de chapa plastificada de madeira, de espessura 10mm.** Por critérios de uniformização e simplificação do orçamento, foi utilizado apenas um tipo de fôrma.
- **Vergalhões de aço CA-50 10mm.** Como primeira estimativa, adotou-se o preço de uma única bitola para todo o consumo de aço, uma vez que não foi possível o acesso ao preço de uma grande variação de diâmetros e foram adotados alguns critérios de uniformização e simplificação do orçamento.

Segue a Tabela 23 com as cotações de preços de materiais e mão de obra, segundo a Revista Construção e Mercado, da PINI:

Tabela 23 - Cotação de preços de materiais (PINI, 2016)

Material	Tipo	Especificação	Preços 2016 (R\$/un)
Concreto (m ³)	fck 25MPa	Brita 1	275,8
Fôrmas (m ²)	Madeira (chapa plastificada)	10mm	18,9
		15mm	25,3
		18mm	35,7
	Madeira (chapa resinada)	10mm	12,0
		15mm	17,9
		18mm	21,8
	Chapa tipo Naval	10mm	58,0
		20mm	108,3
Aço (kg)	CA-50	8mm	4,6
		10mm	4,3
		12,5mm	4,1

A análise foi feita de forma que se obtivesse uma avaliação relevante, dentro de possíveis erros quanto à falta de informação mais detalhada neste momento de projeto e quanto às hipóteses simplificadoras adotadas. Este tipo de estimativa requer um pouco mais de tempo e trabalho que a anterior, mas apresenta um bom resultado para estimar o custo de uma obra ou projeto. É importante ressaltar que esta seria melhor complementada se somada a estudos de casos e a comparações com projetos similares, porém, devido à restrição de tempo para a realização do trabalho, a análise ficou restrita apenas a estas quantificações.

3.2 Solução Convencional

O orçamento da estrutura segundo os dados da Tabela 11 baseia-se na multiplicação de custos unitários de cada material (Tabela 23) por seu consumo resultante, de acordo com a Tabela 24.

Tabela 24 - Custos com material para a Solução Convencional segundo preços PINI

	Material	Especificação	Unidade	Consumo (un)	Preço (R\$/un)	Orçamento (R\$)
mai/16	Concreto	25 MPa	m ³	2.773,30	275,80	764.876,14
	Fôrma	Chapa Plastificada	m ²	2675,00	18,94	50.664,50
	Aço	CA-50 10 mm	Kg	179.666,50	4,29	770.769,29
Total						1.586.309,93

Para se considerar o reuso de sistemas de fôrmas, a área de fôrma total foi estimada a partir de uma velocidade de execução de 2 pavimentos por mês, o que resultou na adoção de dois sistemas de fôrmas, um para 12 reaproveitamentos e o outro para 5, completando os 17 pavimentos do edifício. Esta medida foi adotada para possibilitar a comparação entre as duas medidas, e não impõe restrições a um posterior estudo do melhor gerenciamento de fôrmas para o projeto em questão. A Tabela 25 a seguir apresenta as áreas de cada sistema de fôrmas, justificando o total empregado na composição dos custos.

Tabela 25 - Sistemas de fôrmas para Solução Convencional

Sistemas de Fôrmas (m ²)	Pilares	Vigas	Lajes	Total por Sistema de Fôrmas
12 Aproveitamentos	283	447,2	812,7	1542,9
5 Aproveitamentos	365,3	312,4	454,4	1132,1
Total por Elemento	648,3	759,6	1267,1	2675

A partir dos dados obtidos, tem-se que o custo gerado pela solução estrutural convencional escolhida, composto pela soma de custos de materiais, poderia ser aproximado por R\$ 1.586.309,93.

Usualmente, a estrutura representa de 13% a 20% do custo total de uma obra. O presente caso trata de uma arquitetura não usual, portanto, é esperado que os custos de estrutura sejam mais significativos em relação ao custo total da obra. O custo acima obtido equivale a 14,7% do CUPE e 16,2% do CUB, sem considerar a parcela referente à mão de obra. Conclui-se, portanto, que o valor se enquadra na expectativa.

3.3 Solução de Laje Nervurada

O orçamento de materiais para a solução em Laje Nervurada foi obtido, assim como o da Solução Convencional, baseado nos levantamentos de quantitativos obtidos pelo CAD/TQS presentes na Tabela 16. A obtenção dos custos foi baseada na multiplicação das quantidades obtidas pelos custos unitários (Tabela 23) baseados nos levantamentos da revista PINI de maio de 2016 para concreto, fôrmas (de madeira) e aço, e em uma estimativa fornecida pelo contato comercial da Atex

para o custo do aluguel de cubetas. Os resultados se encontram expressos na Tabela 26.

Tabela 26 - Orçamento de materiais da solução em Laje Nervurada

	Material	Especificação	Unidade	Consumo (un)	Preço (R\$/un)	Orçamento (R\$)
mai/16	Concreto	25 MPa	m ³	2520,6	275,80	695.181,48
	Fôrma	Chapa Plastificada	cubeta	1876,8	18,94	35.546,59
	Aço	CA-50 10 mm	kg	167617,3	4,29	719.078,22
dez/16*	Cubeta	ATEX660/26	m ²	3278,2	10,00	32.782,00
					Total	1.449.806,29

Torna-se importante ressaltar-se que as cubetas são contabilizadas em forma de aluguel, portanto, compõem um preço mensal. Para considerar isso sem perder base de comparação por falta de prazo de execução, foi adotada uma velocidade de 2 pavimentos por mês. A partir disso, para cada mês de execução da estrutura, foi calculado o número de cubetas necessárias. Assim, foi o total de 3278,2 m² de cubetas, sendo que cada cubeta possui dimensões em planta de 0,66 m x 0,66 m.

A mesma lógica para reuso de fôrmas citada no item [item] foi aplicada para a solução em Laje Nervurada, resultado na Tabela 27.

Tabela 27 - Sistemas de fôrmas para a solução em Laje Nervurada

Sistemas de Fôrmas (m ²)	Pilares	Vigas	Lajes	Total por Sistema de Fôrmas
12 Aproveitamentos	283	375	461,4	1119,4
5 Aproveitamentos	365	277,9	114,5	757,4
Total por Elemento	648	652,9	575,9	1876,8

A partir dos dados obtidos, tem-se que o custo gerado pela solução estrutural convencional escolhida, composto pela soma de custos de materiais, poderia ser aproximado por R\$ 1.449.806,29.

Usualmente, a estrutura representa de 13% a 20% do custo total de uma obra. O presente caso trata de uma arquitetura não usual, portanto, é esperado que os custos de estrutura sejam mais significativos em relação ao custo total da obra. O custo acima obtido equivale a 13,4% do CUPE e 14,8% do CUB, sem considerar a parcela referente à mão de obra. Conclui-se, portanto, que o valor se enquadra na expectativa.

4. Quantidade de Trabalho

Este parâmetro busca quantificar uma estimativa do consumo necessário de mão de obra para a execução da estrutura em cada caso.

A necessidade de utilização deste parâmetro surgiu de duas dificuldades encontradas no decorrer da elaboração do trabalho.

A primeira dificuldade consiste na perda de potencial de comparação implícita no processo de estabelecimento de um Prazo de Execução da estrutura, à medida que isso implica na definição de uma equipe, ou seja, a inserção de uma variável nova e de difícil comparação entre soluções que poderiam, eventualmente, ter um equilíbrio de custo de equipe/vantagem de redução de prazo de difícil comparação.

A segunda dificuldade remete à complexa definição de um custo de mão de obra, tendo em vista que isso pode depender muito da construtora em questão, se haverá terceirização de serviços, o quanto os encargos decorrentes da mão de obra estarão dissolvidos em mais ou menos obras, etc.

Desta maneira, optou-se por retirar a consideração de mão de obra do parâmetro de custo e avaliá-la de maneira conjunta com uma comparação dos potenciais prazos de execução, associadas em um parâmetro comum a ambos.

Outro argumento favorável à adoção deste parâmetro foi a equivalência, na prática, da mão de obra empregada em ambas as soluções comparadas. Evidentemente, no caso de uma comparação entre soluções que requerem mão de obra de diferentes níveis de especialização, este parâmetro deveria ser revisto, podendo eventualmente ser adotada uma ponderação.

4.1 Revisão Bibliográfica

Como já foi evidenciado no parâmetro de custos, a editora Pini possui uma vasta gama de compilações e publicações técnicas, além de grandes levantamentos de diversos parâmetros de interesse da engenharia civil para servir como fonte de consulta.

Uma destas publicações para consulta é a chamada Tabela de Composição de Preços para Orçamentos (TCPO), que traz a composição de consumos de diversos serviços associados às obras de engenharia civil de modo geral. Um destes componentes é justamente o consumo em horas de trabalho de mão de obra.

Como o consumo de mão de obra (em hora) pode ser diretamente relacionado tanto com a quantidade de horas dispendidas pelo funcionário, quanto com a quantidade de funcionários empregados na tarefa, foi escolhido considerar a medida de quantidade de trabalho como sendo a de Homem-hora, ou seja, equivalente a uma pessoa trabalhando durante uma hora. Essa aproximação da linearidade da relação é uma simplificação de fenômenos muito complexos que envolvem a produtividade dos funcionários, mas a medida foi adotada para poder ter um parâmetro simples, ainda válido para a comparação de soluções.

A edição consultada foi a 13ª edição da publicação dessas tabelas (2010) e a edição mais atual é a 15ª, a ser lançada em março de 2017. No entanto, considerou-se que, por se tratarem de consumos e não de preços, a variação destes não é elevada, portanto, a utilização de valores desatualizados não é necessariamente tão custosa à comparação, já que os valores para ambas as soluções foram extraídos da mesma edição.

4.2 Solução Convencional

Foram considerados apenas os serviços relativos aos elementos que foram abordados durante o desenvolvimento do trabalho, portanto, as fôrmas, aço e concretagem.

Para a composição da quantidade necessária de cada serviço, são consideradas todas as utilizações deste, por exemplo: uma fôrma de 10 m² para 10 aproveitamentos requer 100 m² de utilização. Para o caso do escoramento, foi considerada a área necessária de fôrmas para cada pavimento, não sendo considerado o excesso embutido no total do sistema de fôrmas.

Os valores de área de cada sistema de fôrmas podem ser encontrados na Tabela 25, enquanto o restante dos materiais, assim como as áreas para cimbramento, estão quantificados na Tabela 11.

A Tabela 28 apresenta o cálculo da quantidade de trabalho total.

Tabela 28 - Composição da quantidade de trabalho para Solução Convencional

Tipo de Serviço	Profissional	Quantidade de trabalho demandada por unidade produzida (Hh/un)	Quantidade Necessária (un)	Quantidade total de trabalho (Hh)
Fôrma com chapa compensada plastificada, e = 12 mm, para pilares/vigas/lajes, incluso contraventamentos/travamentos com pontaletes 7,5 cm x 7,5 cm - 12 aproveitamentos - m ²	Carpinteiro	0,676	18514	15644
	Ajudante de Carpinteiro	0,169		
Fôrma com chapa compensada plastificada, e = 12 mm, para pilares/vigas/lajes, incluso contraventamentos/travamentos com pontaletes 7,5 cm x 7,5 cm - 5 aproveitamentos - m ²	Carpinteiro	0,816	13585	13857
	Ajudante de Carpinteiro	0,204		
Escoramento Metálico para lajes de edificação com pé-direito entre 2,00 m e 3,20 m - m ²	Ajudante de Carpinteiro	0,2	7774	1555
Escoramento Metálico para vigas de edificação com pé-direito entre 2,00 m e 3,20 m - m ²	Ajudante de Carpinteiro	0,2	5206	1041
Armadura de aço para estruturas em geral, CA-50, diâmetro até 10,0 mm, corte e dobra industrial, fora da obra - kg	Ajudante de Armador	0,06	179667	21560
	Armador	0,06		
Transporte, lançamento, adensamento e acabamento do concreto em estrutura - m ³	Pedreiro	1,65	2773	17056
	Servente	4,5		
			Total	70713

4.3 Solução com Laje Nervurada

Para a composição da quantidade necessária de cada serviço, são consideradas todas as utilizações deste, por exemplo: uma fôrma de 10 m² para 10 aproveitamentos requer 100 m² de utilização. Para o caso do escoramento, foi considerada a área necessária de fôrmas para cada pavimento, não sendo considerado o excesso embutido no total do sistema de fôrmas.

Os valores de área de cada sistema de fôrmas podem ser encontrados na Tabela 27, assim como os valores de área para o cimbramento e quantitativos dos materiais restantes encontram-se na Tabela 16.

A composição é a descrita na Tabela 29.

Tabela 29 - Composição da quantidade de trabalho para solução em Laje Nervurada

Tipo de Serviço	Profissional	Quantidade de trabalho demandada por unidade produzida (Hh/un)	Quantidade Necessária (un)	Quantidade total de trabalho (Hh)
Fôrma com chapa compensada plastificada, e = 12 mm, para pilares/vigas/lajes, incluso contraventamentos/travamentos com pontaletes 7,5 cm x 7,5 cm - 12 aproveitamentos - m ²	Carpinteiro	0,676	13433	11351
	Ajudante de Carpinteiro	0,169		
Fôrma com chapa compensada plastificada, e = 12 mm, para pilares/vigas/lajes, incluso contraventamentos/travamentos com pontaletes 7,5 cm x 7,5 cm - 5 aproveitamentos - m ²	Carpinteiro	0,816	3787	3863
	Ajudante de Carpinteiro	0,204		
Montagem de Fôrma pré-fabricada com chapa compensada plastificada, e = 12 mm, para lajes - m ²	Ajudante de Carpinteiro	0,074	5634	2090
	Carpinteiro	0,297		
Escoramento Metálico para lajes de edificação com pé-direito entre 2,00 m e 3,20 m - m ²	Ajudante de Carpinteiro	0,2	7983	1597
Escoramento Metálico para vigas de edificação com pé-direito entre 2,00 m e 3,20 m - m ²	Ajudante de Carpinteiro	0,2	4585	917
Armadura de aço para estruturas em geral, CA-50, diâmetro até 10,0 mm, corte e dobra industrial, fora da obra - kg	Ajudante de Armador	0,06	167618	20114
	Armador	0,06		
Transporte, lançamento, adensamento e acabamento do concreto em estrutura - m ³	Pedreiro	1,65	2521	15502
	Servente	4,5		
			Total	55433

4.4 Comparação de Quantidade de Trabalho

A solução com Laje Nervurada obteve valores significativamente menores de quantidade de trabalho necessária, o que se reflete bastante na redução de consumo de material decorrente desta alternativa.

5. Considerações Finais

5.1 Comentários

Como objetivo deste trabalho, propôs-se o estabelecimento de uma metodologia para comparação de soluções propostas, por meio da análise de determinados parâmetros. Esta metodologia buscava encontrar o que seria uma solução ótima para o problema proposto, após um número arbitrário de iterações.

Um dos princípios norteadores para a escolha dos parâmetros analisados foi o caráter interdisciplinar do projeto de estruturas. Foi prezada uma tendência a parâmetros mais genéricos e abrangentes. Esta simplificação de parâmetros ainda fornece margem para aprimoramentos e solidificação. Apesar disso, consideramos os resultados obtidos satisfatórios.

No trabalho desenvolvido, foi escolhida uma arquitetura e concebida uma solução estrutural inicial, a qual sofreu alterações em seu dimensionamento, para que requisitos de desempenho estrutural fossem atendidos. Com base nesta, foi proposta uma solução alternativa, em Laje Nervurada.

Os parâmetros para ambas as soluções foram analisados, e a conclusão obtida foi de que, apesar das incertezas contidas nos parâmetros, a solução alternativa apresentou, em geral, maior vantagem em relação à convencional.

Desempenho:

O conceito de desempenho é demasiadamente abrangente e não tem caráter muito bem definido sobre o que seria considerado um parâmetro ou um critério. Idealmente, o emprego deste conceito como uma base de comparação requer uma fragmentação deste em critérios, exigidos por norma para que um sistema estrutural possa ser considerado uma solução, e em parâmetros, que permitam comparação entre as diferentes soluções.

Custo:

A avaliação preliminar dos custos de uma obra é uma atividade de precisão extremamente variável, dependendo do nível de detalhamento presente no objeto de estudo e do planejamento para sua execução. Além da dificuldade de se obter quantitativos precisos, a obtenção de valores de referência para preços também é dificultada por sua alta volatilidade, já que a construção civil é, por si só, um mercado de expressiva importância na economia e extremamente suscetível às suas reviravoltas.

Além da formação da estimativa de orçamento para a estrutura como parâmetro de comparação, também é importante a verificação do peso relativo desse custo em relação ao custo total da obra, de maneira a verificar se a proporção de custos é coerente com aquela esperada para a edificação tratada. Esta etapa, no presente trabalho, foi desenvolvida a partir das estimativas baseadas nos índices

CUB e CUPE, que por sua vez são pouco maleáveis em relação ao tipo de edificação, e pode, portanto, ter sua representatividade prejudicada.

Apesar das eventuais perdas de precisão impostas pela qualidade da informação disponível, é imprescindível ressaltar que a qualidade de informação deve ser compatibilizada entre as alternativas comparadas, de maneira que a comparação não fique prejudicada por conta de discrepâncias.

Quantidade de Trabalho:

A quantidade de trabalho foi um parâmetro desenvolvido para quantificar indiretamente a relação entre custo e a quantidade de mão-de-obra e prazo-de-execução, tendo em vista que a execução de ambas as soluções dependem do tamanho da equipe contratada para cada tarefa.

Assim como mencionado acima, a imprecisão dos quantitativos levantados nos modelos desenvolvidos e a qualidade da informação obtida dos condicionantes deve ser considerada na comparação.

Ainda, os valores de consumo de mão-de-obra são bem menos voláteis no tempo se comparados aos valores de preço unitário, mas podem ser variáveis em relação à produtividade e a técnica empregada.

5.2 Conclusões

	Solução Convencional	Solução Nervurada
Desempenho	+	-
Custo	-	+
Quantidade de Trabalho	-	+

Figura 53 - Comparação entre as soluções

Vale ressaltar que os sinais representados na Figura 53 não indicam avaliações absolutas para cada tipo de solução, mas sim considerações comparativas entre elas. Não foram adotados pesos ou notas devido à dificuldade de se precisar em números sua influência no projeto como um todo. No entanto, a escolha da melhor solução não levou em consideração apenas a matriz acima, mas também o fato de se saber que o desempenho teve diferenças muito pequenas entre as soluções para favorecer a primeira.

Por fim, pode-se depreender que, dentro do projeto realizado, com aquelas específicas dimensões de elementos, a solução de laje nervurada se demonstrou mais barata e menos trabalhosa, porém com uma performance inferior àquela convencional.

A abordagem tratada neste estudo nos permite concluir que a definição da palavra “otimização” no projeto de uma estrutura, depende de um equilíbrio entre as diversas questões que o afetam (desempenho, custo, tempo de execução, etc.).

Assim, para se atingir uma estrutura que seja otimizada em relação a todos esses aspectos, deve-se adotar uma postura interativa entre as áreas de engenharia e arquitetura, visando, essencialmente, otimizar seus custos e seu desempenho.

Podemos, portanto, concluir que a estrutura convencional não é necessariamente a melhor solução para um projeto, podendo haver outras soluções mais atraentes, que exijam um menor custo ou ainda encorporem um melhor desempenho. Ou seja, baseado em alguns fatores limitantes, comparações entre diferentes soluções são necessárias para otimizar um projeto.

5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Ficam registradas, para guiarem a continuidade do trabalho, as seguintes sugestões:

- Sugestão e inclusão de novos parâmetros que possam ser relevantes para orientar o processo proposto na metodologia;
- Aprofundamento dos parâmetros já incluídos, propondo novas maneiras de medi-los e interpretá-los;
- Elaboração de indicadores e um processo de diagnóstico que facilite a escolha de soluções candidatas;
- Aplicação da metodologia desenvolvida para outros casos, adicionando comparações e, portanto, etapas na iteração na busca de uma solução mais adequada ao projeto arquitetônico proposto.

6. Referências Bibliográficas

ALBUQUERQUE, A. *Análise de alternativas estruturais para edifícios em concreto armado*. 1999. 106p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

ALVA, G. *Concepção estrutural de edifícios em concreto armado*. Centro de Tecnologia, Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 24p, 2007.

ARAÚJO, J. *Projeto estrutural de edifícios de concreto armado*. 3ª edição. Rio Grande: Dunas, 2014. 50p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: projeto de estruturas de concreto – procedimento – elaboração. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: cargas para o cálculo de estrutura de edificações – elaboração. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: forças devido ao vento em edificações – elaboração. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432/2001: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – procedimento – elaboração. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15200/2004: projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – procedimento – elaboração. Rio de Janeiro, 2014.

BASTOS, P. *Estruturas de concreto I: lajes de concreto*. Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 119p, 2015. Notas de aula.

CUPE. Disponível em: <<http://tcpoweb.pini.com.br/IndiceCustoSel.aspx>>. Acessado em 15 de Junho de 2016.

CUSTO UNITÁRIO BÁSICO (CUB/m²): PRINCIPAIS ASPECTOS. BELOHORIZONTE: Sinduscon- MG, 2007. 112f. Disponível em: <http://www.sindusconmg.org.br/site/arquivos/cub/cartilha_cub.pdf> Acessado em 15 de Junho de 2016.

PINHEIRO, L.; MUZARDO, C.; SANTOS, S. *Fundamentos do concreto e projeto de edifícios*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 380p, 2003-2007.

SILVA, L. *Boas práticas para projeto estrutural de edifícios altos*. 53º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON 2011, Florianópolis, 2011.

TCPO - Tabelas de composições de preços para orçamentos. 13. ed. São

Paulo: Pini, 2010.