

ARTUR ANTONIO DAL PRÁ

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE PROJETO PARA
PAVIMENTOS SEM VIGAS EM CONCRETO ARMADO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de MESTRE em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Nabal Ataliba Marcellino

Florianópolis (SC)
2012

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca
Universitária da UFSC.

Dal Prá, Artur Antonio

Análise de alternativas de projeto para pavimentos sem vigas em concreto armado [dissertação] / Artur Antonio Dal Prá ; orientador , Narbal Ataliba Marcellino –

Florianópolis, SC, 2010.

126 p. ; 21 cm

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia civil. 2. Concreto Armado. 3. Projeto de Estruturas de Concreto. 4. Pavimentos de Estruturas de Concreto. I. Marcellino, Narbal Ataliba. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. III . Título.

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE PROJETO PARA
PAVIMENTOS SEM VIGAS EM CONCRETO ARMADO**

ARTUR ANTONIO DAL PRÁ

Dissertação julgada e adequada para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, PhD – Coordenador do PPGEC

Prof. Narbal Ataliba Marcellino, Dr. – Orientador / Moderador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Roberto Chust Carvalho, Dr. – UFSCar

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, PhD – UFSC

Prof. Ângela do Valle, Dra. – UFSC

Agradecimentos

A Deus, pela oportunidade de receber os conhecimentos adquiridos ao longo do mestrado.

Aos meus pais e minhas irmãs, pela compreensão, paciência, revisão e conselhos.

À Daniella Costa de Moura, pelo incentivo e apoio nos momentos finais.

Ao meu orientador, pelo tempo e dedicação despendidos durante o andamento das atividades de mestrado.

Aos colegas e professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, em especial aos colegas André Puel, Kleyser Ribeiro, Elisabeth Junges, Anderson Darwin, Rodrigo Teixeira, Carlos Tubs, Carlos Menegazzo, Gustavo Amaral, Mariana Martino Caldeira, Jefferson Rafael Bueno, Flávia Gelatti, Daniel Venâncio Vieira, Ronaldo Parisenti, Fernando Toppan Rabello e Lourenço Panosso Perlin, dentre outras coisas, pela amizade.

Aos amigos Daniele Artini Gujel e Daniel Capellari, pelas fotos concedidas e revisão.

Aos professores da banca, pelo tempo dedicado à minha dissertação.

À CAPES e ao CNPq, pelas bolsas de mestrado.

Pois onde estiver vosso tesouro, ali
também estará o vosso coração.

(Lucas 12:34)

RESUMO

Há diversas alternativas estruturais para pavimentos em concreto armado de edificações, podendo ser empregados sistemas sem vigas (lajes lisas, nervuradas e maciças), sistemas convencionais (de lajes, vigas e pilares), ou até mesmo combinar ambos os sistemas, aproveitando as vantagens específicas de cada um deles conforme os fins a que se destinam.

Cada uma destas opções tem seu uso direcionado às características geométricas de cada projeto. Ou seja, os vãos a ser vencidos e as diversas possibilidades de posicionamento dos pilares.

O mercado imobiliário mostra-se competitivo, então é apropriado combinar qualidade, baixo custo e rapidez. Dependendo das características da obra, justifica-se privilegiar algum determinado aspecto dentre os demais. Este trabalho se propõe a avaliar, de maneira comparativa, algumas soluções para estruturas de pavimentos sem vigas, nas diferentes alternativas construtivas: lajes maciças sem vigas (com e sem armadura para evitar a punção), laje lisa nervurada com cubetas e alternativa para pavimento convencional de laje-viga-pilar. Para fazer tal estudo, definem-se dois diferentes projetos, onde ocorre o dimensionamento das alternativas citadas e obtenção dos índices de consumo para direcionar anteprojetos e estimar viabilidade de alternativas.

Conclui-se que não é adequado afirmar que determinada alternativa é sempre mais viável em detrimento de outra, pois cada caso tem suas particularidades e a análise de viabilidade deve compreender as consequências impostas por cada alternativa, como a influência do Estado Limite de Serviço e os aspectos arquitetônicos.

Palavra-Chave: Concreto Armado, Projeto de Estruturas de Concreto, Pavimentos de Estruturas de Concreto.

ABSTRACT

There are several alternatives for structural concrete floors of buildings, can be employed without beams systems (flat slabs, ribbed and solid), conventional systems (slabs, beams and columns), or even combine both systems, taking the specific advantages of each of them according to their intended purposes.

Each of these options has its use targeted to geometric characteristics of each project. That is, the gaps to be overcome and the various possibilities for positioning of the columns.

The real estate market seems to be competitive, then it is appropriate to combine quality, low cost and speed. Depending on the characteristics of the work is justified to focus a preference among the others. This study aims to assess in a comparative way some solutions to structural floors without beams in different constructive alternatives: solid slabs without beams (with and without reinforcement to avoid punch), ribbed slab with buckets and alternative to conventional floor slab-beam-column. To make such study were defined two different projects, which were calculated the alternatives mentioned and provided parameters for direct projects and estimate the feasibility of alternatives.

Conclude that it isn't appropriate to say that a particular alternative is always more viable over another, because each case has its own peculiarities and feasibility analysis should consider the consequences imposed by each alternative, as the influence of the Service State and architectural aspects.

Keyword: Reinforced Concrete, Design of Concrete Structures, Floors of Concrete Structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cubetas de polipropileno. Fonte: ATEX (site) ...	20
Figura 2 – Plantas de fôrmas (Cavalaro & Carbonari, 2006)	26
Figura 3 – Projeto arquitetônico (Albuquerque ,1999)	28
Figura 4 - Discretização do pavimento tipo (Duarte, 1998). 30	
Figura 5 – Planta baixa do pavimento Tipo (Spohr, 2008) ..	32
Figura 6 – Pórtico em representação unifilar (Ed. Blue Diamond) gerado pelo Eberick V7Gold, versão demonstrativa	38
Figura 7 - Momentos fletores em grelha de laje lisa. Fonte: Ref. (Marcellino & Dal Prá, 2011).....	40
Figura 8 - Ligação pilar x grelha. Fonte: Eberick V7Gold, conteúdo da ajuda.....	42
Figura 9 – Projeto arquitetônico do Comercial Rubi (Sem escala).....	46
Figura 10 – Projeto arquitetônico do Comercial Maranello (Sem escala)	47
Figura 11 – Casca nervurada em concreto armado: Centro de Convivência do Idoso (Treze de Maio – SC).....	73
Figura 12 - Laje lisa nervurada no Floripa Shopping / Florianópolis (SC) (Fotografia em 05/agosto/2012)	74
Figura 13 – Esforços cortantes para o Comercial Maranello, processamento em CypeCAD.	76
Figura 14 – Elementos geométricos de laje nervurada	78

Figura 15 – Ordem de grandeza de sistemas bidirecionais. Adaptação (Sistemas Estruturais Ilustrados, 2010)	97
Figura 16 - Ábaco de ordem de grandeza: espessura em função do vão (Adapt. Faria, 2004)	98
Figura 17 - Comparativo de consumo de aço (kg) (Marcellino & Dal Prá, 2010)	116
Figura 18 - Comparativo de volume de concreto (m ³) (Marcellino & Dal Prá, 2010)	116
Figura 19 – Consumo de fôrmas por área de pavimento. (m ² /m ²) (Marcellino & Dal Prá, 2010).....	117
Figura 20 - Alternativas com vigas-faixa.....	123

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Quantidades de fôrmas (lajes).....	110
Quadro 2 - Quantidades de fôrmas (vigas).....	110
Quadro 3 - Quantidades de fôrmas (pavimento)	111
Quadro 4 - Volume de concreto (lajes)	111
Quadro 5 - Volume de concreto (vigas)	112
Quadro 6 - Volume de concreto (pavimento).....	112
Quadro 7 - Consumo de aço (lajes).....	113
Quadro 8 - Consumo de aço (vigas).....	113
Quadro 9 - Consumo de aço (pavimento)	114
Quadro 10 - Espessura média do pavimento.....	119

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS.....	22
1.1.1	Geral	23
1.1.2	Específicos	23
1.2	JUSTIFICATIVA	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	NAPPI (1993).....	25
2.2	CAVALARO & CARBONARI (2006).....	25
2.3	ALBUQUERQUE (1999).....	27
2.4	ALMEIDA (2002).....	28
2.5	MELGES (2001)	29
2.6	FIGUEIREDO (1989)	29
2.7	DUARTE (1998)	30
2.8	SPOHR (2008)	31
2.9	SILVA (2002).....	32
2.10	NORMATIZAÇÃO PERTINENTE.....	33
2.11	PRINCIPAIS DESAFIOS PROPOSTOS NA ETAPA DE PROJETO.....	33
3	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROJETOS E TEORIAS ABORDADAS	35
3.1	PANORAMA DO INCORPORADOR E DO CONSTRUTOR....	36
3.2	ASPECTOS GERAIS SOBRE A MÃO-DE-OBRA	36
3.3	RECURSOS DISPONÍVEIS PARA A PESQUISA.....	37
I)	Considerações sobre as Tabelas de Bares	38
II)	Analogia de grelhas	40
3.3.1.1	Comparações: Tabelas de Bares x Analogia de Grelhas....	42
III)	Uso do programa computacional.....	43
4	PROJETOS ESCOLHIDOS	45
4.1	PROJETO 1: COMERCIAL RUBI.....	45
4.2	PROJETO 2: COMERCIAL MARANELLO.....	46
4.3	CONSIDERAÇÕES INICIAIS E GERAIS SOBRE A ANÁLISE DOS PROJETOS.....	47
4.4	PARTICULARIDADE DOS PROJETOS E REPRESENTATIVIDADE.....	48
4.5	DESCRIÇÃO DAS ALTERNATIVAS ESTRUTURAIS EM ESTUDO	48
5	MATERIAIS E DURABILIDADE.....	51

5.1	DADOS GERAIS	51
6	ESTADO LIMITE DE SERVIÇO	53
6.1	ESTADO LIMITE DE ABERTURA DE FISSURAS.....	53
7	ALTERNATIVA PARA PAVIMENTOS DE EDIFICAÇÕES	55
7.1	ALTERNATIVA 1 – LAJE MACIÇA SEM VIGAS (E SEM CAPITÉIS)	56
	I) Critérios para projeto	57
	II) Desenvolvimento	58
7.2	ALTERNATIVA 2 – LAJE LISA NERVURADA COM CUBETAS	72
	I) Critérios para projeto	74
	II) Desenvolvimento para o Edifício Comercial Rubi	76
	III) Desenvolvimento para o Comercial Maranello	78
7.3	ALTERNATIVA 3 – LAJE MACIÇA COM VIGAS	87
	I) Critérios para projeto	88
	II) Desenvolvimento	88
8	DIRETRIZES PARA CONCEPÇÃO E ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE ESTRUTURAS COM PAVIMENTOS SEM VIGAS 97	
	a) Considerações sobre as lajes.....	97
	b) Considerações sobre a arquitetura	98
	c) Considerações sobre efeitos globais	98
9	LEVANTAMENTO DE QUANTITATIVOS	101
10	ÍNDICES DE CONSUMO PARA A ANÁLISE QUANTITATIVA	103
10.1	DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES	104
11	ANÁLISE DOS RESULTADOS	107
11.1	ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA....	107
11.2	COMBINAÇÕES DAS ALTERNATIVAS	108
11.3	ANÁLISE DE ADEQUABILIDADE ARQUITETÔNICA	108
11.4	ANÁLISE DE QUANTITATIVOS	109
	I) Área de fôrmas	109
	II) Volume de concreto.....	111
	II) Consumo de aço.....	112
12	CONCLUSÕES.....	121
13	TRABALHOS FUTUROS	123
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
	BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA.....	129

1 INTRODUÇÃO

O mercado da construção civil mostra-se cada vez mais competitivo, visto que existem muitas construtoras comercializando unidades autônomas, daí a busca pela redução de custos, em suas diversas abrangências: posicionamento da edificação num local de desenvolvimento econômico da cidade, concepção da estrutura da edificação, emprego de fontes renováveis, definição de aspectos estruturais, diferenciais arquitetônicos, controle de desperdício na construção civil, dentre outras.

O desenvolvimento dos materiais, técnicas e inovações tecnológicas direcionadas à construção civil repercutem em novos produtos que atuam como alternativas ao que convencionalmente vem sendo executado.

Assim, podem ser elencados alguns itens relacionados conforme o programa de necessidades do incorporador:

- a) Tempo: Quanto menor o tempo de execução, mais rápido será o retorno financeiro. Esta é uma variável importante que pode fazer com que um sistema seja escolhido dentre os demais. Será aplicável quando o mercado imobiliário possuir características de fluidez para absorver o empreendimento;
- b) Custo: pode-se empregar o critério de adotar a solução que apresentar o menor custo ou, de outra maneira, gerenciar melhor a obra variando o tempo de execução conforme a disponibilidade de recursos;
- c) Materiais e técnicas disponíveis: atualmente têm-se diversas opções proporcionadas por novos materiais, como cubetas plásticas para material de enchimento, que aceleram determinadas técnicas construtivas. Alguns tipos de estruturas de pavimentos apresentam características executivas que as tornam mais onerosas que as outras em determinadas situações, outras se mostram sem aplicabilidade por critérios de modulação ou de vãos, ou até mesmo podem conduzir à viabilidade por possuir melhores características acústicas, ou melhores propriedades térmicas;



Figura 1 – Cubetas de polipropileno. Fonte: ATEX (site)

A Figura 1 mostra o uso das cubetas reaproveitáveis de polipropileno (cada uma de lado 60 cm) e ressalta a necessidade da modulação no projeto.

d) Formas de arquitetura mais complexas: o formato geométrico da edificação e a disposição dos ambientes afeta diretamente a modulação do pavimento. Algumas vezes é fator limitante, pois alguns vãos podem não ser adequados a determinado tipo de estrutura pré-moldada ou pré-fabricada.

O custo de uma edificação não é definido somente pelos consumos dos materiais e mão-de-obra, mas também pelas consequências que a escolha da adoção de determinada alternativa de pavimento causa. Nota-se, principalmente em grandes centros urbanos, tendência de uso da alternativa estrutural de pavimento sem vigas, pois, em certos casos, são muitas as suas vantagens sobre os demais sistemas.

Este trabalho é motivado pela crescente necessidade de índices para análise de quantitativos que se referem aos pavimentos de lajes sem vigas, os quais estão cada vez mais em uso, visando a necessidade de combinar o rápido processo construtivo, que se justifica pelas facilidades executivas oferecidas, com qualidade e custos reduzidos. Também, pela carência de informações sobre análise de custos

estruturais nestas tipologias de edificações, a motivação é servir como estimativa inicial para tomada de decisões e antever os custos devidos aos consumos de materiais estruturais de maneira aproximada.

Estas estimativas iniciais mostram sua aplicabilidade porque permitem ao incorporador dispor de uma ordem de grandeza dos consumos e assim pré-avaliar os custos sem a necessidade de preparar os detalhamentos finais e o levantamento de quantitativos.

As análises são fundamentadas em dois projetos: um deles contém estrutura com vãos mais uniformemente distribuídos e outro possui uma arquitetura mais complexa. Objetiva-se que estes projetos sejam representativos de grande parte das edificações usualmente edificadas em Florianópolis (SC), para direcionar as estimativas iniciais em projetos através do fornecimento de índices aplicáveis.

As principais vantagens em estudar dois projetos são a possibilidade de identificar o impacto da variável arquitetônica na perturbação dos resultados e validar os resultados pela ordem de grandeza.

Dada a extensão e abrangência do assunto, pode-se afirmar que são diversas as delimitações deste trabalho, como por exemplo, estruturas muito diferentes destas em questão podem conduzir a uma interpretação dos custos estruturais de maneira equivocada ou até mesmo induzir a adoção de uma alternativa de concepção estrutural para o pavimento que não seja a mais economicamente viável.

Cavalaro & Carbonari (2006) explicam que o campo da construção civil se mostra amplo, complexo e com um grande número de atividades interdependentes. Por consequência disto, qualquer estudo de viabilidade torna-se complexo, visto que as alterações, mesmo sensíveis, causam desdobramentos sequenciais em todo o processo produtivo.

A composição do estudo de viabilidade de um empreendimento envolve também outras análises além da questão estrutural. Tal consideração é abordada junto com as características qualitativas, citadas no decorrer deste trabalho.

A dinâmica de competitividade do mercado da construção civil e o nível de desenvolvimento tecnológico, combinados com as exigências dos compradores de imóveis, fazem necessário que as alternativas de pavimentos escolhidas para o projeto estrutural sejam estudadas. Elas definem quão onerosas podem ser as atividades de acabamento, a disposição dos pilares e até mesmo as vagas de garagem.

Para tanto pode ser realizado o estudo comparativo de diferentes opções construtivas para pavimentos de estruturas de edificações. Tais

estudos fornecem índices importantes para a determinação dos custos estruturais.

Os custos dos insumos e da mão-de-obra variam diferentemente conforme o tempo e as características econômicas das localidades, de maneira que o tratamento das informações com unidades monetárias é uma limitação das publicações encontradas atualmente e pode induzir imprecisões nas análises. O tempo e os recursos necessários à execução também são variáveis importantes.

Diversas são as alternativas de projeto para pavimentos de edificações, como por exemplo: lajes maciças, nervuradas com ou sem enchimento, com nervuras pré-moldadas do tipo vigotes (trilho) ou treliçadas, lajes pré-fabricadas alveolares, ou ainda as lajes lisas ou cogumelo “sem vigas”. Em determinadas situações podem ser usadas duas soluções diferentes num mesmo pavimento.

Este trabalho traz aplicações destinadas principalmente às edificações com menos de quatro pavimentos. Este estudo limita-se a uma comparação entre lajes maciças de concreto armado com e sem vigas e de laje lisa nervurada, sendo que todos estes possuem vigamento nos bordos e escadaria.

Este estudo é realizado para duas arquiteturas de edifícios comerciais de altura que possibilita deixar de abordar as implicações da estabilidade global e concentrar-se nas opções construtivas citadas como meio de validação dos resultados e comparação dos impactos da variável arquitetônica. Para edificações de altura considerável devem ser acrescentadas as devidas verificações das condições de estabilidade global e ação do vento, de modo a justificar a estrutura adotada.

Para a comparação, é realizada a modelagem computacional do pavimento por analogia de grelhas em programa de cálculo estrutural, para a obtenção dos esforços solicitantes para dimensionamento dos elementos. Depois das verificações e da análise, são obtidos os quantitativos de área de fôrmas, de volume de concreto e de consumo de aço.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal a análise de alternativas de concepção estrutural para pavimentos sem vigas com finalidade de obter índices que servem de subsídio para comparações acerca das alternativas estruturais de pavimentos de lajes sem vigas.

É esperado que conduza a informações relevantes para as etapas de projeto de pavimentos sem vigas em concreto armado, tão escassas nas bibliografias.

1.1.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é fornecer diversas informações, tanto as básicas e iniciais para direcionar a elaboração de projetos, quanto sobre as comparações finais que auxiliem na definição do projeto de estruturas de concreto usando pavimentos sem vigas, para que este conteúdo contribua com critérios de racionalização, qualidade e redução de custos estruturais nas edificações.

1.1.2 Específicos

Para possibilitar o êxito do objetivo geral supracitado, faz-se necessário o cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

- a) estabelecer as diretrizes para a concepção de lajes lisas;
- b) demonstrar os roteiros de análise, dimensionamento e detalhamento das lajes lisas no tocante aos Estados Limites Últimos para esforços de flexão e cisalhamento e Estados Limites de Serviço;
- c) comparar consumos das diferentes alternativas verificando a influência das diversas variáveis em estudo;
- d) definir critérios que tornam a concepção de estruturas de pavimentos sem vigas mais econômica.

1.2 JUSTIFICATIVA

Para muitas edificações, depois do projeto arquitetônico, o estrutural é aquele que produz maior impacto no custo da obra.

As publicações atuais sobre pavimentos de lajes sem vigas costumam tratar de tipologias específicas de pavimentos, ou então de algum detalhe específico de determinada tecnologia. São poucos os trabalhos que correlacionam uma alternativa de pavimento sem vigas com outra. Nota-se que são ainda menos disponíveis aquelas publicações que confrontam índices de consumo conforme a variabilidade das disposições arquitetônicas.

Outra dificuldade é encontrar trabalhos que contemplem tal estudo em mais de uma edificação, permitindo o uso do formato da

arquitetura como variável. O estudo dos índices de consumo ainda é a melhor maneira de pré-visualizar e prever tipologias de anteprojetos arquitetônicos no que se refere a custos estruturais, embora seja incorreto afirmar que determinada escolha de alternativa para definir a estrutura de um pavimento seja absoluta para alguma disposição arquitetônica, ou qualquer outra variável isoladamente.

ALBUQUERQUE (1999) expõe que os custos estruturais correspondem a uma etapa de grande valor na composição do custo global da edificação. É de suma importância reduzir o máximo possível destes custos. Pode-se intervir na definição da estrutura do pavimento, pois esta corresponde a uma das parcelas mais significativas dos custos estruturais. Comumente verifica-se que, para estruturas convencionais (com lajes, vigas e pilares), cerca de metade do volume de concreto gasto corresponde às lajes.

É visível que o tratamento das informações com unidades monetárias é uma limitação das publicações encontradas atualmente e que pode vir a induzir imprecisões, uma vez que os custos dos insumos e da mão-de-obra variam diferentemente conforme o passar do tempo e as características econômicas das localidades.

Tem-se o intuito de estabelecer qualitativos que venham a dispensar o estudo de viabilidade de imediato alguma alternativa de pavimento, para determinada situação adversa (mão-de-obra desqualificada, mercado consumidor conservador, materiais construtivos com preços muito desproporcionais entre as regiões do país, exigências construtivas locais, entre outros).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este item é trata informações relevantes de alguns estudos relacionados ao assunto deste trabalho, aborda dissertações, teses, artigos, normatização e lista alguns fatores que dificultam o emprego das alternativas em estudo.

2.1 NAPPI (1993)

A dissertação intitulada *Análise comparativa entre lajes maciças, com vigotes pré-moldados e nervuradas*, desenvolvida por Nappi (1993) estuda alternativas para pavimentos de lajes com vigotes pré-moldados, lajes maciças, lajes nervuradas com blocos de poliestireno expandido, lajes nervuradas com blocos de concreto celular autoclavado e lajes nervuradas com blocos cerâmicos. Para cada uma destas cinco alternativas, atribuem-se três modelos de projetos arquitetônicos, cada um com dois pavimentos.

A comparação entre as alternativas envolve as variáveis carga total e consumo dos materiais, tratando os dados conforme unidades monetárias. Cita aspectos qualitativos no decorrer de sua dissertação. Expõe composições de custos para cada tipo de laje estudado. Conclui que a influência do peso específico do enchimento para lajes nervuradas não é significativa na variação do peso da estrutura. Conclui também que as lajes maciças são uma boa opção para edifícios onde possa ser garantido o reaproveitamento das fôrmas.

2.2 CAVALARO & CARBONARI (2006)

Cavalaro & Carbonari (2006) estudaram duas alternativas estruturais para uma única edificação: estrutura convencional e estrutura com CAD (concreto de alto desempenho), conforme plantas de fôrmas da Figura 2:

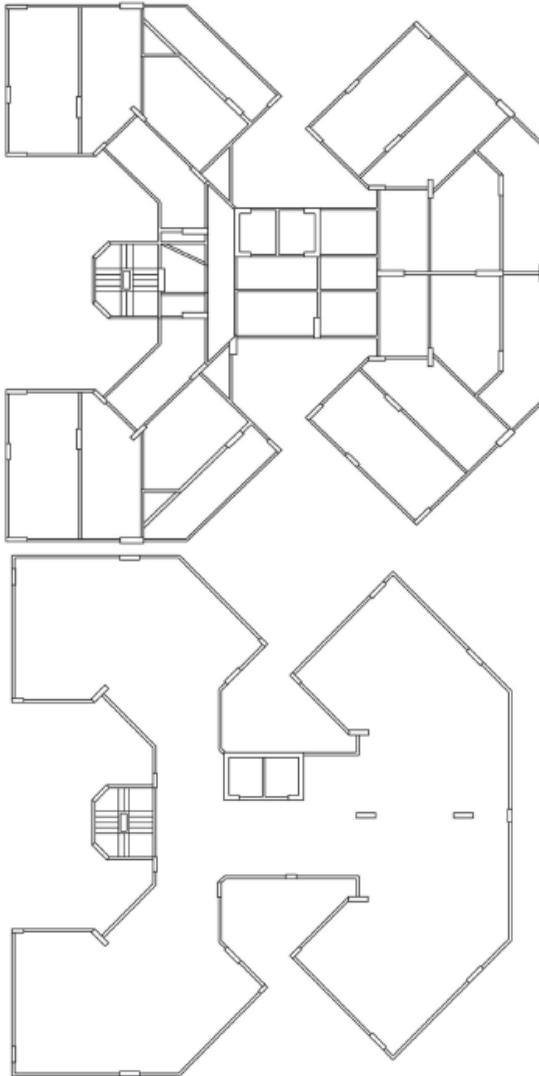


Figura 2 – Plantas de fôrmas (Cavalaro & Carbonari, 2006)

As quantidades são tratadas por valores monetários, então existe a consideração dos indicadores econômicos TIR (taxa interna de retorno) e VPL (valor presente líquido).

Depois de avaliar diversos cenários de mercado, concluem que o uso de sistemas não convencionais (concreto de alto desempenho e laje plana

protendida maciça), tende a serem opções competitivas em relação aos sistemas usuais, se garantido o pleno conhecimento das técnicas e a velocidade de execução.

2.3 ALBUQUERQUE (1999)

A dissertação intitulada *Análise de alternativas estruturais para edifícios em concreto armado*, elaborada por Albuquerque (1999) estuda, para um único projeto arquitetônico, sete opções: (1) estrutura convencional com lajes maciças, (2) laje nervurada com caixotes, (3) laje nervurada com tijolos, (4) laje nervurada pré-fabricada, (5) laje lisa nervurada com caixotes (6) laje lisa nervurada com tijolos e (7) laje lisa protendida.

Este estudo realiza levantamento de consumo de materiais (concreto, aço, fôrmas), analisa os parâmetros espessura média (volume de concreto por área de pavimento), taxas de aço I e II (consumo de aço por volume de concreto e consumo de aço por área de pavimento) e taxa de fôrma (área de fôrma por área de pavimento), e leva em consideração os efeitos globais (embora apenas cite tais parâmetros), visto que trata de um edifício de planta simétrica, com vinte pavimentos.

Faz, ainda, análise por custos, não levando em consideração o efeito das instalações e necessidades de forros nos comparativos. Também analisa os custos das fundações. Realiza a análise monetária, muito embora omita as composições unitárias, compara os custos por elemento estrutural e por componente (fôrma, aço, concreto).

Cabe a observação que os índices encontrados por Albuquerque (1999) não podem ser confrontados com os deste trabalho, pois as edificações estão submetidas a cargas e implicações devidas a efeitos globais diferentes. Albuquerque conclui que a alternativa de estrutura de lajes maciças deve ter seu uso restrito a casos específicos, pois além de apresentar maior custo, a grande quantidade de vigas dificulta sua execução. Conclui ainda que a alternativa de estrutura de laje nervurada com cubetas mostra-se a mais econômica e adequada ao projeto.

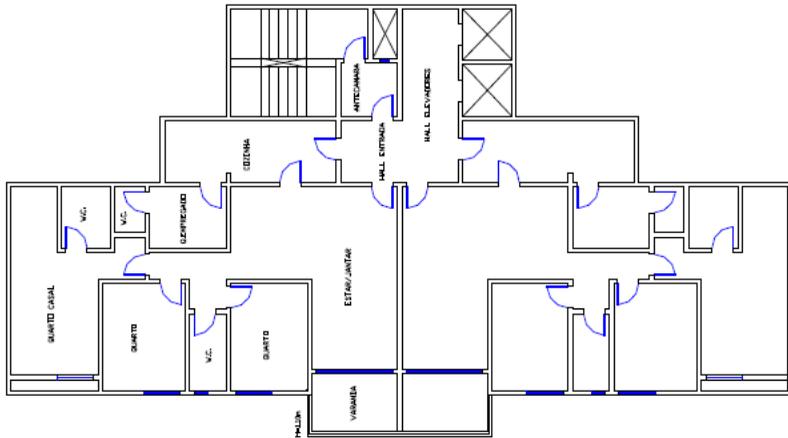


Figura 3 – Projeto arquitetônico (Albuquerque ,1999)

2.4 ALMEIDA (2002)

A dissertação intitulada *Estruturas de pisos de edifícios com a utilização de cordoalhas engraxadas*, elaborada por Almeida (2002) avalia, para o mesmo projeto de Albuquerque (1999), as alternativas de lajes lisas maciças, lajes lisas nervuradas, lajes nervuradas apoiadas em vigas faixas protendidas. Para este projeto, comparam-se o volume de concreto, quantidade de armadura (tanto para concreto armado quanto para concreto protendido) e área de fôrmas. Levanta os índices de taxa de aço I e II (consumo de aço por área de pavimento e consumo de aço por volume de concreto), espessura média (volume de concreto por área de pavimento), taxa de fôrmas (área de fôrmas por área de pavimento) e taxa de pilares (quantidade de pilares por área de pavimento).

Conclui que a aplicação de protensão não-aderente em edifícios tem se mostrado cada vez mais frequente, e que isto se deve à procura de imóveis com disposição de ambientes flexibilizada. Depois de analisar seis modelos com estrutura protendida, chega a conclusão que a laje plana nervurada com protensão aderente é a mais econômica em termos de consumo de materiais, mas não no quesito tempo de execução.

Quanto ao consumo de materiais, conclui que a estrutura em concreto armado é mais econômica, visto que se exige espessura mínima de 16 cm para lajes protendidas maciças.

2.5 MELGES (2001)

A tese intitulada *Análise experimental da punção em lajes de concreto armado e protendido*, desenvolvida por Melges (2001) analisa experimentalmente seis modelos que são submetidos à ruptura por punção. Traz informações importantes sobre normas e superfícies de ruptura, não analisa os consumos de materiais.

Conclui que a resistência à punção do modelo é elevada significativamente quando se faz uso da armadura para evitar a punção. Conclui ainda que a presença de protensão eleva a resistência da ligação e que a revisão da NB-1 (2000) é a norma que melhor representa o comportamento da ligação laje-pilar.

2.6 FIGUEIREDO (1989)

A tese de Figueiredo (1989), intitulada *Sistemas estruturais de lajes sem vigas: subsídios para o projeto e execução*, descreve as características e tipologias de sistemas sem vigas, transcrevendo as teorias disponíveis para o dimensionamento e verificação dos Estados Limites. Dá recomendações construtivas e compara custos destes sistemas com aqueles convencionais, para estruturas de concreto armado. Traz quatro projetos simples de painéis retangulares, com e sem balanço, levanta os quantitativos de um pavimento e os relaciona conforme o volume de concreto, área de fôrmas e consumo de aço. As composições são definidas pela TCPO (Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos) e o orçamento dos insumos ocorre conforme o mercado local.

Os pavimentos estudados pelo autor possuem área e geometria muito distintas daquelas deste estudo, então não faz sentido confrontar os índices de Albuquerque (1999) com aqueles deste estudo.

Acerca dos custos, este autor conclui que os pavimentos sem vigas são sensivelmente mais econômicos que aqueles com vigas e que o emprego de vigas de borda não afeta os custos de maneira significativa. Ressalta ainda que o consumo de materiais para lajes sem vigas de vãos maiores que 6 m aumenta excessivamente, onerando o

sistema. Para vãos maiores que 6 m, os pavimentos constituídos de estrutura convencional se mostraram mais econômicos que os pavimentos de laje lisa maciça.

2.7 DUARTE (1998)

A dissertação intitulada *Aspectos da análise estrutural das lajes de edifícios de concreto armado*, elaborada por Duarte (1998) estuda alternativas de análise estrutural de lajes maciças (tabelas, analogia de grelhas e método dos elementos finitos) para um pavimento tipo de um edifício residencial. Cita disposições construtivas e prescrições para detalhamentos.

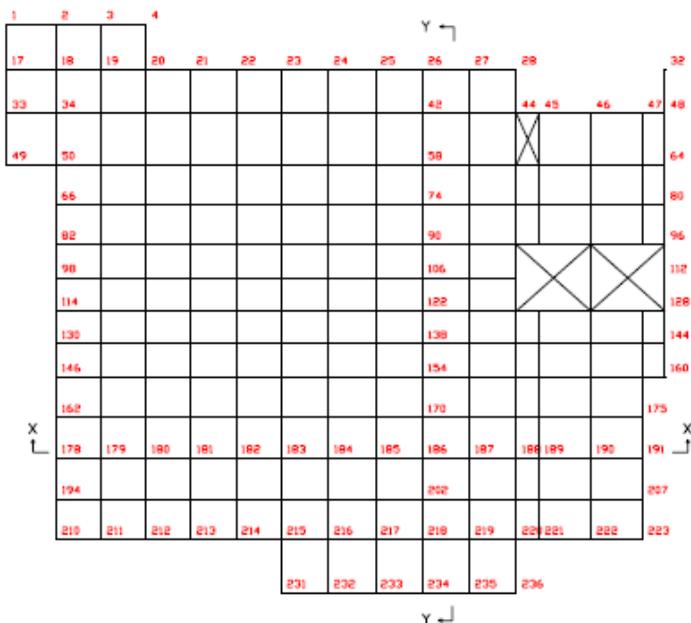


Figura 4 - Discretização do pavimento tipo (Duarte, 1998)

A Figura 4 mostra a malha com espaçamento de 1 x 1 m, incluindo a numeração dos nós, para este pavimento tipo. O autor levanta quantitativos de consumo de aço e foca sua análise nos métodos e comparação de esforços solicitantes.

Conclui afirmando que os consumos encontrados quando usados métodos simplificados resultaram muito próximos, devido à ocorrência

de diversas regiões com armadura mínima, e que os esforços solicitantes obtidos pela Teoria das Charneiras Plásticas foram menores que aqueles obtidos pelo uso de tabelas. Cita ainda que o acréscimo de consumo de aço quando usadas telas soldadas não é significativo a ponto de descartar esta opção, e que seu uso é mais econômico devido ao aprimoramento que se obtém para a fase executiva. Por ser irrelevante ao seu estudo, visto que se trata de análise de pavimento, o autor omite a quantidade de pavimentos de sua edificação.

2.8 SPOHR (2008)

A dissertação de Spohr (2008), intitulada *Análise comparativa: sistemas estruturais convencionais e estruturas de lajes nervuradas* estuda, para um único projeto, as alternativas de estrutura convencional com lajes maciças, estrutura convencional com lajes treliçadas e estrutura de lajes lisas nervuradas. Compara volume de concreto, área de fôrmas, consumo de aço, taxa de concreto, taxas de aço (I e II) taxa de fôrmas para uma edificação de nove pavimentos. Trata a análise por custo monetário (que é indexado ao Custo Unitário Básico, fornecido pelo Sindicato da Indústria da Construção Civil). Considera ação do vento e analisa os efeitos globais.

Conclui que, apesar de apresentar menor volume de concreto, as lajes treliçadas tem maior consumo de aço que as outras opções. Os menores índices (consumo de aço por volume de concreto e consumo de aço por superfície de pavimento) são da laje lisa nervurada. Verifica ainda que, conforme a alteração de alternativa para pavimento, a variação dos consumos de materiais nos pilares e fundações é irrelevante.

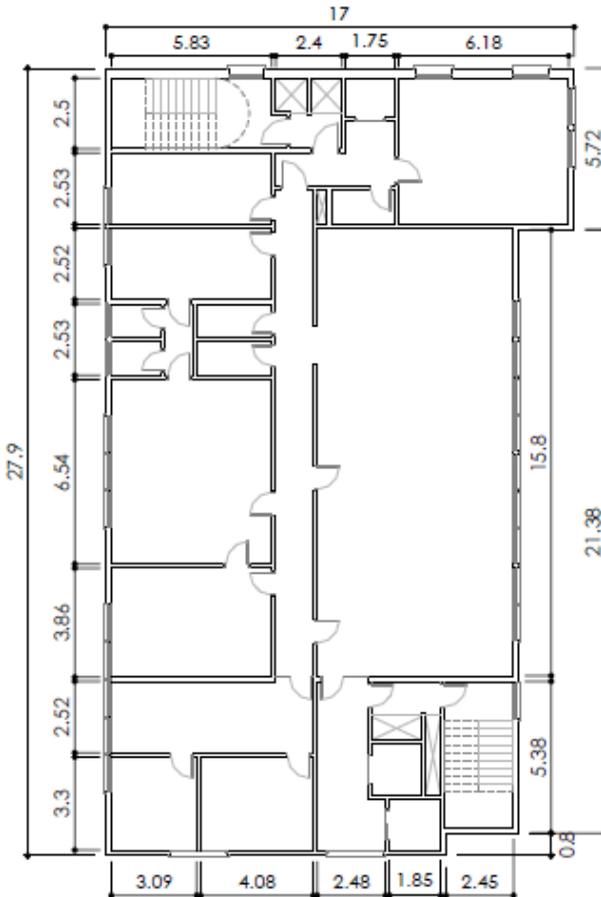


Figura 5 – Planta baixa do pavimento Tipo (Spohr, 2008)

2.9 SILVA (2002)

A dissertação intitulada *Análise comparativa de custos de sistemas estruturais para pavimentos de concreto armado*, elaborada por Silva (2002) avalia três pavimentos de edifícios distintos, variando o sistema estrutural conforme as alternativas de laje convencional maciça, laje lisa maciça, laje lisa nervurada (Poliestireno Expandido) com vigas faixas, laje lisa nervurada (bloco de concreto celular autoclavado), laje

lisa nervurada (cubetas) com vigas faixa. Compara área de fôrmas, volume de concreto, consumo de aço, trata os valores por unidades monetárias e levanta o custo total considerando a influência dos revestimentos (forros).

Conclui que a alternativa de laje lisa nervurada com cubetas é a alternativa de menor custo dentre as analisadas. Em segundo lugar está a alternativa convencional que, apesar de apresentar o maior custo de fôrmas, possui um menor consumo de aço. Em terceiro lugar está a alternativa de laje lisa nervurada com blocos de poliestireno expandido, devido ao custo das fôrmas e em quarto lugar está a laje lisa nervurada com blocos de concreto celular autoclavado, pelo custo destes blocos.

Em último lugar está a alternativa de laje lisa maciça, pela elevada quantidade de fôrmas, consumo de aço e volume de concreto.

2.10 NORMATIZAÇÃO PERTINENTE

As principais referências normativas são as seguintes:

- * NBR 6118/2007: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Esta é a principal norma de que este trabalho faz uso. Ela traz recomendações acerca dos procedimentos de projeto para as alternativas de pavimentos escolhidas.
- * NBR 14931/2004: Execução de estruturas de concreto
Desta norma são aproveitadas as técnicas construtivas que se referem especificamente às alternativas de pavimentos que este trabalho aborda.
- * NBR 6123/1988: Forças devidas ao vento em edificações.
- * NBR 6120/1980: Cargas para o cálculo de estruturas.
- * NBR 8681:2003. Ações e segurança nas estruturas – Procedimento.

Ambas as normas estão implementadas no programa computacional (AltoQI Eberick V7 Gold, versão demonstrativa), restando definir quais carregamentos são importantes para as edificações que estão sendo estudadas.

2.11 PRINCIPAIS DESAFIOS PROPOSTOS NA ETAPA DE PROJETO

A pré-análise da estrutura possibilita identificar os principais desafios propostos, tendo em vista os diversos fatores que dificultam seu desenvolvimento, expostos pelas literaturas consultadas:

- a) Adequar as necessidades, mantendo o padrão esperado de funcionalidade a que a edificação se propõe. Existem diversos usos a que são destinadas as edificações. Este trabalho estuda edifícios comerciais;
- b) padrão de acabamento esperado da obra: o padrão da obra interfere na necessidade de ocultar ou não a estrutura;
- c) disposição dos vãos: os vãos alteram a relação entre os lados das lajes, então ocorre um comportamento diferenciado conforme seus atributos de unidirecionalidade ou de bidirecionalidade. Objetiva-se encontrar a solução mais indicada para a concepção da estrutura;
- d) altura da edificação: os efeitos de segunda ordem mostram-se tão mais significativos conforme a relação entre a altura da edificação e a base aumenta. Outro efeito da altura da edificação no custo estrutural é a redução do custo conforme o acréscimo das repetições de cada pavimento;
- e) magnitude das cargas: os esforços solicitantes aumentam conforme o acréscimo da magnitude das cargas, então se torna necessário elevar o consumo dos materiais para suportar tais solicitações;
- f) dificuldades construtivas: a heterogeneidade da mão-de-obra ocasiona fatores que prejudicam o andamento das atividades, como por exemplo, o desconhecimento das técnicas de execução de pavimentos sem vigas. Daí a necessidade de treinamento da mão-de-obra e acréscimo do custo de execução. Vale ressaltar que conforme aumenta a repetição de serviços semelhantes, a mão-de-obra apresenta ganho de produtividade, conforme explica a teoria da linha de balanço. Um planejamento estratégico direciona a escolha da alternativa de pavimento à disponibilidade de fornecimento das fôrmas e de outros materiais para a redução dos custos;
- g) uso de tecnologia inovadora na região: as características de regionalismo podem apresentar restrições a tipologias de pavimentos não difundidos na região. Se ocorrer a viabilidade econômica de pavimentos sem vigas sobre aqueles com vigas, os preços das unidades podem ser mais competitivos e tais restrições são vencidas pela ação da especulação imobiliária.

Identificados os possíveis fatores que dificultam a etapa de projeto, são estudadas alternativas de concepção de modelos estruturais que, além de estabilizar a estrutura, interferem o mínimo possível na arquitetura. Esta análise de interferências envolve conceitos de compatibilização de projetos e traz como resultados índices de consumo de estruturas para edifícios de múltiplos pavimentos em concreto armado.

3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROJETOS E TEORIAS ABORDADAS

Para a comparação das alternativas, tornando a análise mais abrangente, foram escolhidos dois projetos, que foram considerados representativos das situações de pavimentos sem vigas ou lajes lisas.

Um dos motivos para estudar dois projetos distintos é a possibilidade de analisar o efeito que ocorre da redução do consumo de aço quando aumenta o volume de concreto.

Para a fase de um projeto em geral, destacam-se as seguintes etapas:

- a) Idealização e definição das variáveis arquitetônicas;
- b) concepção estrutural, pré-dimensionamento e definição do arranjo estrutural;
- c) definição de ações e cargas;
- d) processamento da estrutura: definição dos esforços solicitantes;
- e) dimensionamento dos elementos estruturais e verificação das condições de serviço;
- f) detalhamento dos elementos estruturais;
- g) levantamento de quantitativos e dos índices necessários e suficientes (aqueles citados no final deste trabalho), para possibilitar a análise e considerações finais sobre viabilidade econômica.

Apesar do trabalho tratar sempre as alternativas pela descrição *sem vigas*, todos os projetos possuem vigamento nas bordas, tendo em vista que a adoção de vigas nos contornos traz diversas vantagens:

- a) estruturais: aumento de rigidez, eliminação da necessidade de verificação de punção nos pilares de extremidade e de canto e melhoria no desempenho às ações horizontais;
- b) arquitetônicas: as vigas no contorno da edificação servem de fechamento para as aberturas.

Ellwanger (2002) explica o efeito das questões locais, onde cada comunidade tem suas características próprias de mercado e legislativas (em teoria, as leis municipais devem ser sempre mais restritivas que as leis estaduais e federais), que podem impor exigências que venham a influenciar a escolha de determinada alternativa de pavimento. Um fator que influencia a escolha de determinada alternativa de pavimento é a proximidade entre o local da obra e seus fornecedores. Pode ocorrer o caso em que determinada alternativa de pavimento seja beneficiada pela

disponibilidade de materiais e equipamentos, visto que a redução do custo de transporte evita atrasos no cronograma da obra, que também é uma maneira de economizar.

3.1 PANORAMA DO INCORPORADOR E DO CONSTRUTOR

O incorporador é aquele profissional que planeja a edificação, desde a etapa de projeto até a última unidade comercializada. É ele quem idealiza uma edificação e a materializa num terreno. O processo de inserção da edificação no terreno é conhecido por incorporação e é realizada pelo construtor, que faz uso da mão-de-obra para materializar o projeto no terreno. Para tanto, o construtor espera que a alternativa de pavimento escolhida seja tal que o permita executá-la da maneira mais segura e rápida e com o menor número de funcionários possível.

A remuneração do construtor pode se dar de diversas maneiras, tais como o percentual sobre o material gasto na edificação, ou o pagamento pelas atividades, com eventuais gratificações por produtividade.

Observa-se então que a redução de custos é prioridade para o incorporador, mas não necessariamente para o construtor. Verifica-se que os objetivos do incorporador são distintos daqueles do construtor.

Muitas vezes, o incorporador também atua como construtor, então a situação é aperfeiçoada, dada a concordância de objetivos.

3.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE A MÃO-DE-OBRA

A qualidade da obra é uma variável diretamente proporcional à qualificação da mão-de-obra. REGINO (2010) afirma que nas últimas décadas, controles relacionados com a qualidade têm se desenvolvido, porém sem dar a devida importância para a qualificação da mão-de-obra.

Nota-se que grande parte dos funcionários trabalha de maneira desmotivada. REGINO (2010) ressalta, ainda, a necessidade de incentivos financeiros para o aperfeiçoamento dos trabalhadores, que podem ser evidenciados por acréscimos no salário devidos à qualificação profissional e por planos de carreira. Tais incentivos vinculam o empregado com o contratante e podem reduzir os inconvenientes causados pela falta de comprometimento dos funcionários com relação às atividades desempenhadas e pela alta

rotatividade que a construção civil apresenta. Tais vantagens permitem até mesmo melhorar os índices de acidentes percebidos nos canteiros de obras.

Ainda sobre a mão-de-obra, vale ressaltar a teoria da linha de balanço, onde mais ágil torna-se a execução conforme aumenta o número de repetições, dado o ganho de experiência adquirida pelos operários: algumas tarefas são executadas com mais facilidade e certas etapas são suprimidas, outras acrescidas e melhoradas.

ÁVILA & JUNGLES (2003) explicam que para empreendimentos compostos por sequências idênticas de atividades, serviços ou obras, cuja característica seja a repetitividade dos serviços, executados em série e em tempo pré-estabelecido, para uma mesma quantidade de funcionários, estes mesmos funcionários desempenham as atividades com produtividade crescente conforme a quantidade de repetições executadas. Tais características são aplicadas às alternativas para a definição da estrutura dos pavimentos citadas neste trabalho, ou qualquer outra atividade que se mostre caracterizada pela repetição de serviços semelhantes ou idênticos.

3.3 RECURSOS DISPONÍVEIS PARA A PESQUISA

Para a análise comparativa, é realizada modelagem computacional das alternativas de pavimentos por analogia de grelhas em programa de análise estrutural, para obtenção dos esforços solicitantes e dimensionamento dos elementos.

Depois da verificação e da análise, são obtidos os quantitativos de área de fôrmas, de volume de concreto e de aço. Para auxiliar na análise estrutural dos modelos propostos, dimensionamento e detalhamento, é usado como ferramenta complementar o programa computacional Eberick V7 Gold (desenvolvido pela empresa AltoQI), versão demonstrativa.

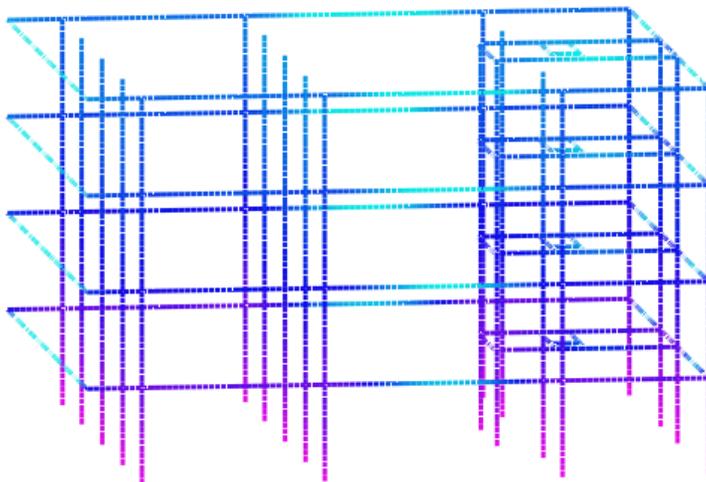


Figura 6 – Pórtico em representação unifilar (Ed. Blue Diamond) gerado pelo Eberick V7Gold, versão demonstrativa

A Figura 6 expõe um pórtico em representação unifilar gerado pelo programa computacional escolhido para auxiliar no desenvolvimento deste trabalho.

I) Considerações sobre as Tabelas de Bares

As teorias de placas delgadas podem ser aplicadas às lajes maciças deste estudo, então é possível calcular deslocamentos e momentos fletores em lajes usando a modelagem em placas, pelo método de cálculo elástico.

Neste método, o comportamento dos elementos de placa é definido em serviço e considera que o concreto está íntegro, ou seja, não apresenta fissuras.

Como hipótese deste método, admite-se que o concreto armado é um material homogêneo, fisicamente linear e elástico, que as deformações ocorridas são de pequena magnitude e que apresenta isotropia (mesmas propriedades em todas as direções do elemento).

Como a resolução das equações traz dificuldades de implementação computacional e é trabalhosa se realizada manualmente,

desenvolveram-se tabelas (por exemplo, Bares/1970, Slizard/1974 e Hahn/1982) que possuem diferenças devidas ao truncamento das séries de Fourier e ao valor adotado para o coeficiente de Poisson.

A resolução das equações (para a elaboração de tabelas) permite algumas simplificações, tais como admitir que as seções permaneçam planas após a deformação, que não há transmissão de torção às vigas de apoio, nem transmissão de esforços diretamente ao pilar, e que as placas apóiam-se em elementos indeslocáveis e a rotação nos contornos é perfeitamente apoiada ou totalmente engastada.

Quando se admite a laje totalmente engastada, está implícito que a rotação neste apoio é nula, o que não ocorre na realidade. Analogamente, a consideração de apoio perfeito também é uma aproximação, uma vez que, na ligação laje-viga, a rotação não é totalmente livre.

O trabalho de Bares (1972) desenvolve soluções em séries para placas com as variadas vinculações e relação entre os lados da placa, obtém coeficientes que são tabelados e dispensam a resolução das equações diferenciais.

Algumas considerações importantes sobre o método de Bares:

- a) fornece apenas o deslocamento máximo;
- b) as placas são retangulares, então para resolver placas irregulares é necessário empregar outro método ou, em certos casos, fazer uso de aproximações;
- c) considera que o apoio seja perfeitamente engastado ou rotulado;
- d) não é fornecido o diagrama exato de momentos fletores negativos, então as armaduras são estendidas até um comprimento pré-estabelecido, que não representa o comprimento necessário (para cobrir o diagrama de momentos fletores acrescentando-se 10ϕ), mas que foi calibrado para considerar a mais desfavorável das combinações de vinculações;
- e) não considera que a fissuração reduz a rigidez, então subestima os deslocamentos;
- f) algumas disposições estruturais induzem esforços importantes, que a solução encontrada pelo uso das Tabelas de Bares não identifica, como por exemplo, pilar muito rígido situado na metade das vigas que servem de apoio para uma laje;
- g) a consideração de apoio rígido é uma aproximação da realidade, deste modo pode-se afirmar que as lajes apresentam resultados tão mais próximos das tabelas, quanto mais rígidos são os apoios. Comumente verifica-se que, devido ao fato de haver apoios deslocáveis, os momentos fletores positivos e as flechas tendem a serem maiores que

aqueles obtidos pelo uso das Tabelas de Bares e os momentos fletores negativos, a ser menores;

h) considera que as placas possuem condição de contorno indeslocável na vertical.

II) Analogia de grelhas

Neste método, o pavimento todo (as vigas e as lajes) é discretizado por um conjunto de nós e barras. Objetiva-se que cada barra represente determinada faixa de laje e que tenha o comportamento equivalente ao desta faixa de laje.

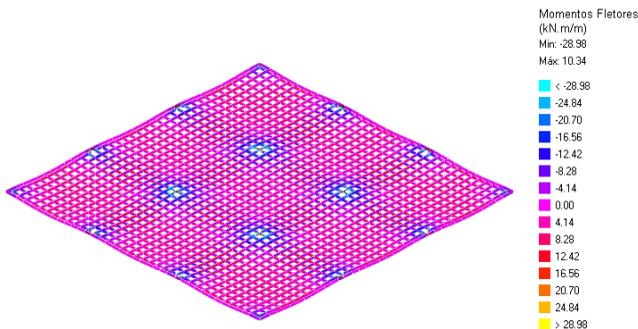


Figura 7 - Momentos fletores em grelha de laje lisa. Fonte: Ref. (Marcellino & Dal Prá, 2011)

O Método da Analogia de Grelhas possui diversas vantagens, tais como:

- pode ser implementado computacionalmente;
- permite a resolução de elementos irregulares. Ressalta-se que nem todas as lajes de formato irregular podem ser bem resolvidas pelo emprego das Tabelas de Bares e que diversas edificações possuem alguma laje de formato irregular.

A modelagem de pavimentos por analogia de grelhas traz benefícios aos projetistas, visto que uma boa malha conduz a uma correta avaliação dos esforços solicitantes, e é comumente considerada mais intuitiva pelos projetistas.

A definição da malha é de fundamental importância para obter-se êxito no emprego deste método. Carvalho & Pinheiro (2009) explicam que, para a aplicação deste método, a placa é substituída por uma malha (grelha) equivalente de barras, onde cada barra representa certa faixa da

placa. O programa computacional faz coincidir o eixo da nervura com o eixo da barra da grelha.

Para as lajes maciças, é definido um espaçamento entre barras desta grelha, sendo que aquele do software usado no processamento das estruturas é 50 x 50 cm. HAMBLY (1976), TAKEYA et alii (1985) e JASSON (1989) recomendam que o espaçamento entre as barras da grelha não ultrapasse 25 % do vão.

No programa computacional escolhido para os estudos deste trabalho, naquilo que tange à aplicação em lajes lisas, deve-se fazer coincidir o ponto de encontro das barras da grelha que constituem as lajes do pavimento com a extremidade da barra que discretiza o pilar. Significa que para cada direção deve haver ao menos uma barra da grelha, estando elas cruzando a seção transversal deste pilar que está posicionado no interior da laje. Assim, será possível ao programa realizar um refinamento automático da grelha na região do capitel.

Tal refinamento consiste em acrescentar barras da grelha nas proximidades da ligação, para que esta maior quantidade de barras corrija o efeito de tensões elevadas demais na ligação grelha x pilar. Os picos de tensão ocorrem por causa da grande variação do momento fletor, neste local a função é descontínua.

Até certo ponto, quanto mais densa a malha (maior quantidade de nós e barras), melhores serão os resultados, apesar de aumentar o tempo de processamento. Stramandinolli (2003) esclarece que, à medida que se refina a malha, não há uma convergência dos resultados obtidos.

Sugere-se definir um espaçamento pouco inferior a 25% do vão para então usar um espaçamento menor entre barras da grelha para estudar os efeitos localizados, como aqueles que ocorrem nas quinas (cantos de escadas, por exemplo). Já para as lajes nervuradas, tem-se como premissa para esta modelagem que cada nervura corresponda a uma barra da grelha, então o eixo da nervura deve coincidir com o eixo da barra da grelha.

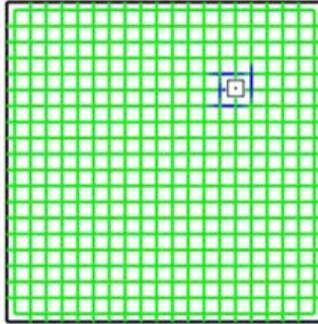


Figura 8 - Ligação pilar x grelha. Fonte: Eberick V7Gold, conteúdo da ajuda

3.3.1.1 Comparações: Tabelas de Bares x Analogia de Grelhas

O processamento do pórtico espacial que considera as vigas como elementos participantes da Grelha Equivalente (que representa o pavimento todo) conduz a resultados mais próximos da realidade quando comparado com os resultados obtidos pelo uso das Tabelas de Bares, que considera cada laje como se fosse um elemento isolado do restante do pavimento, com as limitações já esclarecidas neste trabalho.

O uso de Grelha Equivalente para pavimentos de lajes maciças com vigas apresenta grandes vantagens sobre o método das Tabelas de Bares, quais sejam:

- a) o concreto armado é um material não linear até mesmo para baixos níveis de tensão, e esta não linearidade pode ser inclusa na análise;
- b) permite que os efeitos de haver apoios deslocáveis para as placas sejam considerados na análise;
- c) possibilita a consideração da rigidez à torção de cada elemento estrutural;
- d) a implementação computacional deste método permite seu uso, considerando a rigidez equivalente, conforme o Modelo de Branson. A NBR6118/2007 assume que quando o momento fletor atuante for superior ao momento de fissuração (M_r), admite-se que o concreto está fissurado, então a rigidez dos elementos é menor que aquela adotada, o que não é válido para todos os trechos do elemento estrutural. Para tanto, ao invés de usar o momento de inércia reduzido do estágio II, Branson calibrou uma equação que considera a inércia equivalente.

Deste modo, a rigidez equivalente pode ser aplicada para a avaliação do ELS (Estado Limite de Serviço).

III) Uso do programa computacional

Com base no projeto arquitetônico, a estrutura é concebida alinhando-se os pilares para formar a maior quantidade possível de pórticos principais e secundários, para melhorar o desempenho global da estrutura.

As combinações entre os casos de carregamentos são processados pelo programa computacional, assim como a análise estrutural e o dimensionamento dos elementos. Depois da análise do projetista e sob determinadas intervenções, pode-se fazer uso do detalhamento dos elementos estruturais e quantitativos de materiais.

O programa (*software*) escolhido para o processamento das estruturas deste trabalho considera que os painéis de lajes que constituem o pavimento funcionam como uma grelha. Este procedimento auxilia o cálculo e a verificação das lajes, porque leva em consideração uma rigidez mais real das barras que constituem a grelha, conduzindo resultados mais coerentes com a realidade. As reações das grelhas são descarregadas no pórtico espacial composto por vigas e pilares.

4 PROJETOS ESCOLHIDOS

Para o estudo das variáveis propostas, foram escolhidos projetos com características que se mostram representativas daquelas usuais. Estes projetos permitem, dentre outros aspectos, evidenciar as influências advindas da arquitetura e da disposição das lajes.

São arbitrados dois projetos simétricos, porque se considera que o efeito da assimetria em projetos de arquitetura seja pouco significativo nos custos estruturais.

Os projetos escolhidos possuem quatro pavimentos e são classificados como estruturas de nós fixos, uma vez que não se tem o objetivo de estudar a influência dos efeitos da estabilidade global em estruturas sem vigas.

Objetiva-se projetar pavimentos constituídos por cada uma das seguintes alternativas:

- a) Lajes maciças sem vigas e espessura tal que a armadura para evitar a punção seja desnecessária;
- b) Lajes maciças sem vigas e espessura que necessita de armadura para evitar a punção;
- c) Lajes maciças sem vigas e com nervuras (laje lisa nervurada);
- d) Lajes maciças com vigas (sistema convencional).

As soluções de pavimentos formados por lajes pré-fabricadas foram preteridos neste estudo porque, comumente verifica-se que estes perdem viabilidade conforme aumentam as repetições de pavimentos (o transporte dos vigotes onera o sistema) e conforme aumentam os vãos, podendo em alguns casos, perder a aplicabilidade.

Nenhuma das alternativas deste trabalho abrange a solução por capitéis. Para ambos os projetos escolhidos, a posição e seção transversal dos pilares sofreu pequenos ajustes, para melhor se adequar às exigências estruturais de cada alternativa.

4.1 PROJETO 1: COMERCIAL RUBI

Este projeto está disposto de modo a evidenciar que a melhor solução econômica pode representar uma disposição de pilares cujo posicionamento deve ser iniciado conforme a disposição de ambientes do pavimento tipo. Então se despreza o efeito da influência da concepção estrutural da garagem nos outros pavimentos.

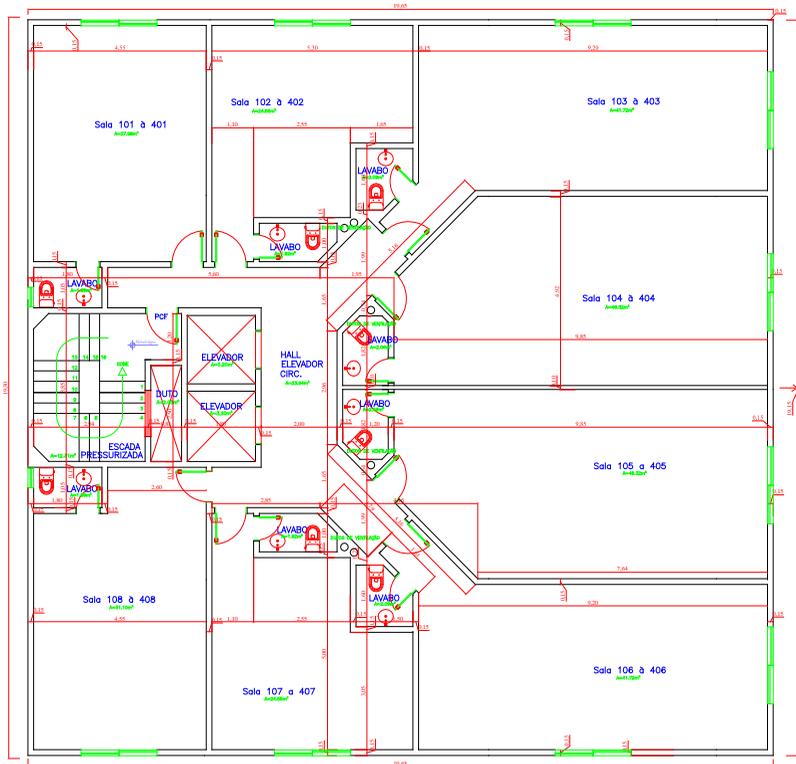


Figura 9 – Projeto arquitetônico do Comercial Rubi (Sem escala)

A Figura 9 sugere que se pode fazer uso de um espaçamento regular entre pilares (ocultando-os nas paredes), formando lajes com comportamento bidirecional.

4.2 PROJETO 2: COMERCIAL MARANELLO

Este projeto mostra uma arquitetura distinta do Comercial Rubi. O chanfro no lado esquerdo complica a modulação da estrutura, que pode ser ocultada nas prumadas de banheiros, paredes e caixa de escada, daí os reflexos da modulação no custo estrutural.

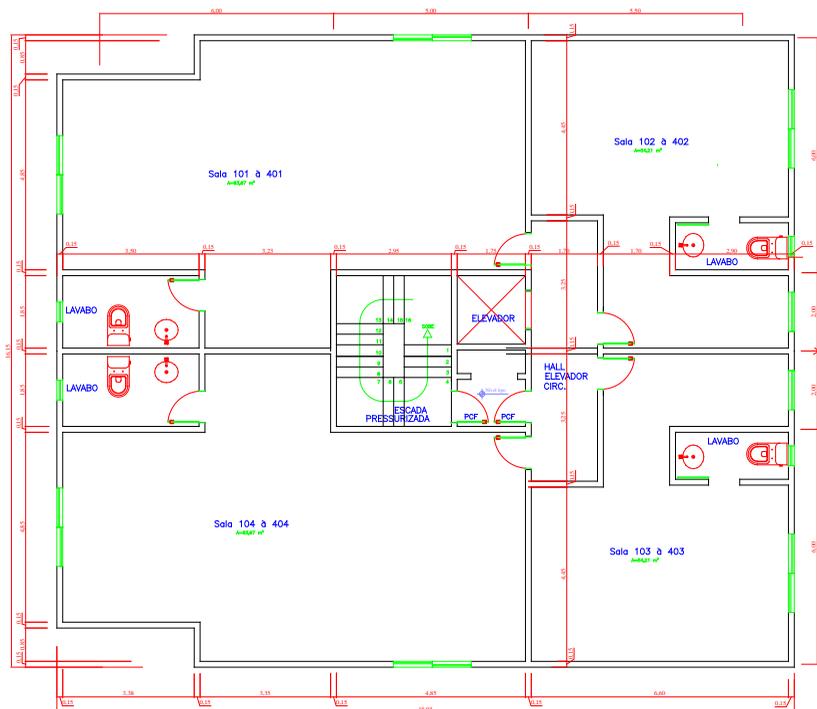


Figura 10 – Projeto arquitetônico do Comercial Maranello (Sem escala)

A Figura 10 permite visualizar a possibilidade de usar as prumadas de banheiros e da caixa de escada e elevadores para o arranjo estrutural dos pilares.

4.3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E GERAIS SOBRE A ANÁLISE DOS PROJETOS

A dinâmica de competitividade do mercado da construção civil e o nível de desenvolvimento tecnológico, combinados com as exigências dos compradores de imóveis, fazem necessário que várias alternativas de pavimentos escolhidas para o projeto estrutural sejam estudadas. Elas definem a onerosidade das atividades de acabamento, a disposição dos pilares e até mesmo das vagas de garagem.

4.4 PARTICULARIDADE DOS PROJETOS E REPRESENTATIVIDADE

As particularidades dos projetos visam expor alguns fatores originados pela arquitetura, que complicam a etapa de concepção estrutural, para contextualizar o trabalho, mesmo que nem todos estes fatores estejam contidos nos projetos escolhidos.

Aos projetos escolhidos existe a necessidade que estes se mostrem representativos daqueles que usualmente vêm sendo executados.

4.5 DESCRIÇÃO DAS ALTERNATIVAS ESTRUTURAIS EM ESTUDO

As soluções distinguem-se umas das outras principalmente pelo fato de que alternativas de construção distintas conduzem a composições unitárias de serviços diferentes.

Nota-se que cada sistema estrutural apresenta vantagens e desvantagens sobre os outros. Assim, torna-se necessário avaliar cada alternativa separadamente, compondo os custos totais referentes aos quantitativos e qualitativos de cada solução, confrontando-os considerando as especificidades regionais, para então compará-los e descobrir qual escolha é mais adequada ao critério escolhido.

Para determinar qual é a alternativa mais adequada com relação à redução de custos, conforme as necessidades de projeto, a etapa de levantamento de custos por opção deve sempre ser realizada na fase de projeto. Um exemplo disto é encontrar aquela que apresenta menor consumo de aço (quando o aço é variável importante), ou aquela que permite maior reaproveitamento e racionalização de fôrmas.

Escolhe-se aquela alternativa que, estabilizando a estrutura, mostrando-se satisfatória conforme as exigências arquitetônicas e atendendo aos requisitos impostos pela NBR 6118/2007 para as condições de serviço, apresenta o menor custo, ou a melhor adaptabilidade arquitetônica, ou até mesmo aquela cujo tempo de execução é menor.

Ao estudar alguma alternativa, deve-se levar em consideração que as consequências de determinada escolha tem resultados que podem ser diretos ou indiretos, sendo que os resultados diretos são aqueles de mais fácil quantificação, pois decorrem da própria escolha (volume de concreto, por exemplo), enquanto os indiretos impactam em outros

setores distintos da solução escolhida, como por exemplo, facilidade nas instalações prediais.

Pode-se citar como resultados diretos as mudanças nas quantidades de concreto, aço ou fôrmas, e como resultados indiretos as alterações nas quantidades de pavimentos, nos custos com fundações, na dispensa de forros ou flexibilidade do esquema de distribuição dos ambientes.

Assim, uma avaliação mais precisa deve considerar uma ponderação entre os efeitos positivos e negativos. Neste caso, o julgamento da viabilidade econômica é efetivo e o impacto de cada simplificação pode ser considerado significativo ou não.

Cavalaro & Carbonari (2006) explicam que geralmente os resultados diretos são economicamente mais importantes. Alguns catálogos de produtos destacam os resultados indiretos positivos e ocultam os resultados diretos negativos, induzindo o cliente ao erro.

Muitos catálogos de fabricantes de cubetas para lajes nervuradas fazem propaganda usando o argumento de que, confrontando laje maciça e laje nervurada, para mesmo volume de concreto, o vão a vencer é maior na laje nervurada porque esta possui maior altura equivalente em inércia. Tal análise é um indicativo de vantagem, apesar de não ser decisiva, pois considera apenas as características geométricas da seção íntegra (não fissurada) não abordando as condições de ELS e ELU (Estado Limite Último), como tampouco abrange todas as particularidades da etapa de projeto. Outras variáveis devem ser analisadas nas comparações entre as alternativas de projeto.

5 MATERIAIS E DURABILIDADE

Para os projetos deste trabalho, foi considerada uma distância do mar que atenua a influência da névoa marítima, e é adotada a classe de agressividade ambiental II, de acordo com exigências da tabela 6.1 da NBR6118/2007. Para esta Classe de Agressividade Ambiental, segundo a tabela 7.1 da norma, impõe o uso de concreto C25 ($f_{ck} = 25$ MPa), no mínimo.

Para as armaduras da edificação, adota-se aço CA-50 ($f_{yk} = 50$ kN/cm²) e aço CA-60 ($f_{yk} = 60$ kN/cm²).

O item 7.4.7.6 da NBR6118/2007 relaciona o diâmetro da armadura ao cobrimento nominal. Conforme este item, o diâmetro dos agregados não pode ultrapassar $\Phi_{m\acute{a}x} = 1,20 * c_{nom}$.

Considera-se, para o concreto armado, peso específico (γ) de valor 25 kN/m³, para concreto simples e argamassa de contrapiso, $\gamma = 24$ kN/m³, para revestimentos e alvenarias de tijolos maciços rebocados, $\gamma = 18$ kN/m³ e para alvenarias de tijolos vazados rebocados, $\gamma = 13$ kN/m³.

Considera-se, para agregado graúdo, brita 0 (diâmetro entre 4,8 a 9,5 mm).

5.1 DADOS GERAIS

Uma das condições para que a comparação entre os resultados das duas edificações seja coerente é que ambas estejam em local semelhante. Então são empregadas as mesmas ações e sobrecargas. A NBR 6120/1980 cita que a carga acidental para salas comerciais é 2,00 kN/m². Para a carga relativa aos revestimentos da laje (regularização e acabamento), considera-se 1,50 kN/m².

Este item também trata de parâmetros de cálculo da NBR6118/2007 úteis para o dimensionamento. Conforme item 8.2.5 da NBR6118/2007, a resistência média do concreto à tração define-se pela relação $f_{ct,m} = 0,3 * (f_{ck})^{2/3} = 2,56$ MPa. A norma define os valores inferiores e superiores a ser considerados: $f_{ctk,inf} = 0,7 * f_{ct,m} = 1,79$ MPa e $f_{ctk,sup} = 1,3 * f_{ct,m} = 3,33$ MPa. Ainda, conforme o item 19.4.1, $f_{ct,d} = f_{ctk,inf} / \gamma_c = 1,28$ MPa.

Conforme item 8.2.8, o módulo de elasticidade inicial do concreto é dado por $E_{ci} = 5600 * f_{ck}^{1/2} = 28000$ MPa, enquanto que o módulo de elasticidade secante é dado por 85% deste valor: $0,85 * E_{ci} = 23800$ MPa.

O coeficiente de ponderação das resistências dos materiais no ELU é dado pela tabela 12.1 da NBR6118/2007, onde $\gamma_c=1,4$ e $\gamma_s=1,15$, assim $f_{cd} = f_{ck}/1,4 = 17,86$ MPa e $f_{yd} = f_{yk}/1,15 = 434,78$ MPa.

O item 8.3.5 da NBR6118/2007 preconiza que deve ser usado módulo de elasticidade 210 GPa (ou 210.000 MPa) para o aço, quando na ausência de ensaios ou de valores fornecidos pelo fabricante.

De acordo com o item 17.3.5.2.1 da NBR6118/2007, para $f_{ck}=25$ MPa e seções retangulares, $\rho_{min}=0,15$ %.

6 ESTADO LIMITE DE SERVIÇO

O programa computacional realiza as verificações do estado limite de serviço. No caso de deformações excessivas, considera-se que a flecha total é composta das parcelas flecha imediata e o acréscimo devido à fluência, sendo esta flecha é calculada conforme a NBR 6118/2007.

A flecha imediata em vigas é avaliada de modo aproximado considerando a rigidez equivalente citada na NBR 6118/2007, para levar em consideração o efeito da fissuração no concreto.

A parcela correspondente à flecha diferida no tempo é obtida pela multiplicação da flecha imediata pelo fator α_f , que corrige o efeito decorrente das cargas de longa duração em função da fluência.

O programa computacional informa o valor da flecha encontrada. Estes valores estão expostos no item *desenvolvimento*, para cada alternativa. A tabela 13.2 da NBR6118/2007 fixa os deslocamentos limites conforme o tipo de efeito considerado.

6.1 ESTADO LIMITE DE ABERTURA DE FISSURAS

A NBR6118/2007 traz prescrições a respeito do estado limite de abertura de fissuras. Para o caso de concreto armado e CAA II, de acordo a tabela 13.3 da NBR6118/2007, deve ser usada combinação frequente de ações em serviço.

A tabela 11.4 da NBR6118/2007 apresenta a descrição das combinações frequentes de serviço, onde $F_{d,ser} = \Sigma F_{gik} + \psi_1 * F_{q1k} + \Sigma \psi_{2j} * F_{qjk}$.

7 ALTERNATIVA PARA PAVIMENTOS DE EDIFICAÇÕES

São diversas as alternativas para a definição da estrutura dos pavimentos de edificações, desde pré-fabricadas até aquelas que podem ser moldadas no local. Cada uma possui particularidades que as fazem sobressair-se sobre as demais, ou tornarem-se inviáveis, podendo ser até mesmo inaplicáveis, conforme a situação.

Muitas vezes, os fatores regionais podem sobressair-se àqueles supracitados, podendo ser determinantes na escolha da alternativa de pavimento a ser efetivada. Dentre os fatores regionais, destacam-se:

- a) o conhecimento da técnica pelos funcionários, proporcionada pelo uso consagrado de determinada técnica em algum lugar;
- b) o conhecimento das vantagens pelos construtores, que dificilmente optam por investir num novo sistema construtivo quando possuem um sistema que não onera excessivamente e dá bons resultados;
- c) o receio por fazer uso de nova técnica, frente à opinião do comprador leigo.

Existem vantagens das alternativas sem vigas sobre as alternativas convencionais, como por exemplo, sob certas condições de carga de paredes, pode-se afirmar que existe flexibilização do esquema de distribuição arquitetônico, que se reflete num diferencial de comercialização positivo.

As alternativas sem vigas possuem algumas desvantagens sobre a alternativa convencional:

- a) algumas escolhas de relação *altura da laje / vão* baixas (em geral, menores que 0,02) resultam em deformações excessivas das lajes;
- b) a ausência de vigas intermediárias causa deformações de maior magnitude que os sistemas convencionais;
- c) os limites entre as unidades autônomas limitam a quantidade de divisórias em planta, então podem ocorrer limitações dimensionais nos recintos;
- d) sobre os aspectos de definição da estrutura dos pavimentos com lajes lisas, cabe ressaltar que a concentração de tensões cisalhantes junto aos apoios tende a puncionar as lajes, por isso deve ser projetada uma região maciça em volta de alguns pilares. Damasceno e Oliveira (2007) explicam que, apesar deste efeito, as lajes são influenciadas pela atuação de momentos fletores em ambas as direções concomitantemente, o que altera a resistência da laje. Ressalta, ainda, que a forma do pilar altera a configuração na ruína, determinando se ocorrerá flexo-punção ou se será uma ruptura por flexão.

A seguir, descrevem-se as alternativas para a definição da estrutura para projetos formados por pavimentos sem vigas e suas principais características.

7.1 ALTERNATIVA 1 – LAJE MACIÇA SEM VIGAS (E SEM CAPITÉIS)

É o sistema estrutural onde as lajes são diretamente apoiadas nos pilares, prescindindo de vigas. Por definição, a ligação entre o pilar e a laje deve ser rígida, exigindo a verificação da punção.

Usualmente são projetadas para vãos em torno de 7 x 7 m. As vantagens são tais, que muitas vezes acabam viabilizando o uso deste sistema em detrimento dos demais. Dentre as principais vantagens, destaca-se a redução do tempo de execução. Além disto, executivamente tem-se um menor consumo de fôrmas e menor desperdício com recortes, maior reaproveitamento das fôrmas e a menor altura dos pavimentos.

Ademais, pode ser realizada a racionalização dos processos construtivos e repetição das atividades de pavimento a pavimento.

O uso deste sistema construtivo acarreta, além daquelas citadas, outras vantagens econômicas que são enquadradas em outras áreas, como por exemplo, execução de instalações, pois são evitados desvios e furos em vigas que existiriam se fosse a alternativa convencional.

Destaca-se também a vantagem de permitir menor altura da edificação (menor altura por andar). Tal característica pode ser considerada um diferencial econômico positivo em algumas cidades onde a legislação limita a altura máxima da edificação, porque permite que a edificação assim concebida disponha de um ou dois andares adicionais. Estas vantagens não são aqui consideradas porque esse trabalho restringe-se à parte estrutural.

Estas lajes se apóiam diretamente nos pilares, são também conhecidas por lajes livres, ou lajes puncionadas. A NBR 6118/2007 esclarece que para suportar tal esforço, estas lajes são armadas contra a punção, podendo se feito o uso de armadura contra a punção por estribos ou conectores que podem ser dispostos radialmente, concentrando-se a armadura nas proximidades do apoio.

Esta alternativa para definição da estrutura do pavimento tende a apresentar viabilidade quando os vãos são uniformes, da ordem de 7 metros, em locais onde as fôrmas podem ser reaproveitadas muitas vezes e as dificuldades de adotar a modulação prejudicam o emprego da opção nervurada.

Nota-se que os custos se elevam de acordo com o aumento do peso próprio, cuja origem pode ser atribuída ao maior distanciamento entre pilares. Neste caso, pode ser interessante usar capitéis para suportar os esforços de punção junto ao apoio e reduzir a espessura da laje na parte central.

Silva (2002) observa que a maior parte de seu custo é devido às fôrmas e ao volume de concreto. Ele se reduz conforme o acréscimo da quantidade de repetições e do reaproveitamento das fôrmas. Entretanto, o uso da tecnologia sem o conhecimento da técnica construtiva pode causar baixa produtividade e dificuldade para a retirada das fôrmas, podendo até mesmo diminuir a quantidade de reutilizações.

Outra desvantagem é que as lajes maciças sem vigas consomem muita área de fôrmas, destacando-se desta maneira, as dificuldades na etapa de fôrmas em algumas localidades e o custo em outras.

O item 13.2.4.1 da NBR 6118/2007 define que a espessura mínima de lajes lisas (sem capitéis) deve ser de 16 cm. Para esta alternativa 1, estuda-se primeiramente o caso da espessura ser maior a ponto de não necessitar de armadura para evitar a punção. No segundo caso, estuda-se quando a espessura é um pouco menor, para necessitar da armadura contra a punção.

I) Critérios para projeto

a) Para padronizar e racionalizar a execução das armaduras, pode-se fazer uso de uma malha base, que consiste na aplicação de uma armadura fixa. Para tanto, o pavimento é dimensionado e, por bom senso, escolhe-se como malha base aquele resultado de armadura que represente o menor custo dentre as opções fixas que não crescem demasiadamente a quantidade de mão-de-obra. As regiões em que as solicitações não são resistidas integralmente pela armadura base recebem uma armadura complementar.

b) Algumas vezes a distribuição dos pilares cria vãos desiguais, o que ocasiona o fato de que alguns quadros de lajes terão armadura mínima e outros muita armadura. Para estes casos, pode ser viável repensar o posicionamento dos pilares.

c) Em projetos com pilares de distribuição regular, e com uma laje por pavimento, a concentração de paredes numa região específica da laje pode ter, por consequência, uma laje de espessura maior em todo o pavimento. Uma possível solução é reduzir o espaçamento de pilares nesta região.

II) Desenvolvimento

a) Para efeitos de representatividade, realiza-se o projeto de laje lisa maciça nas espessuras 16 e 23 cm, para cada um dos edifícios. O pavimento com laje de espessura 16 cm faz necessário o uso de conectores para evitar a punção, enquanto que aquele com espessura 23 cm dispensa o emprego destes conectores. A decisão de usar a mesma espessura é válida pelo fato de que ambos os projetos possuem características semelhantes, como por exemplo, vãos aproximadamente iguais e condições de carga compatíveis.

b) Para o pavimento do Edifício Comercial Maranello, verifica-se que se pode afirmar que as cargas de parede localizadas do lado esquerdo da laje são praticamente metade do valor das cargas localizadas no lado direito, dada a concentração de paredes. Por isto, a laje precisou ficar com 23 cm de espessura: para suportar o elevado momento fletor negativo que ocorre junto ao P11 (lado direito do pavimento), sem necessitar de armadura dupla. A região à esquerda do pavimento apresentava momentos fletores cujo dimensionamento resultava numa armadura possível e a região à direita não.

c) A verificação do Estado Limite de Serviço é realizada para esta alternativa de laje lisa maciça nas espessuras de 16 e 23 cm.

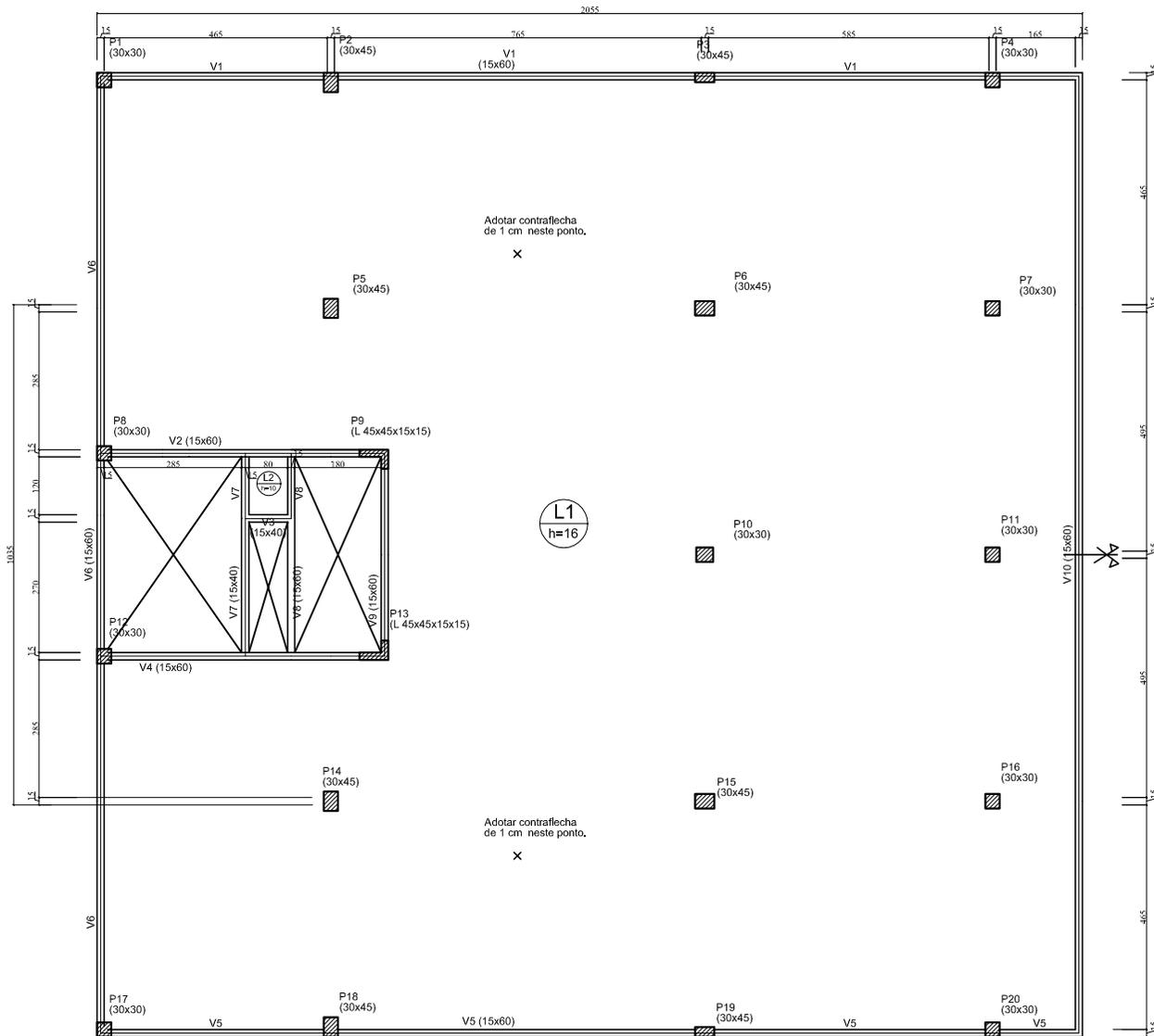
Para o Comercial Rubi, a laje lisa maciça de 16 cm apresentou flecha de valor 3,32 cm, enquanto que o limite vão / 250 resulta 3,12 cm. A solução foi adotar contraflecha de 1 cm. Já na alternativa de espessura 23 cm, a flecha encontrada resultou 1,31 cm, muito menor que o limite 3,12 cm.

Para o Comercial Maranello, a laje lisa maciça de 16 cm apresentou flecha de valor 2,66 cm, enquanto que o limite vão / 250 resulta 2,40 cm. Por solução, adotou-se contraflecha de 1 cm. A alternativa de espessura 23 cm resultou flecha de valor 1,12 cm, muito inferior ao limite 2,40 cm.

Seguem os projetos de fôrmas e armaduras.

Comercial Rubi
Laje lisa maciça h = 16 cm - Fôrmas

Prancha 1/3
Sem escala.

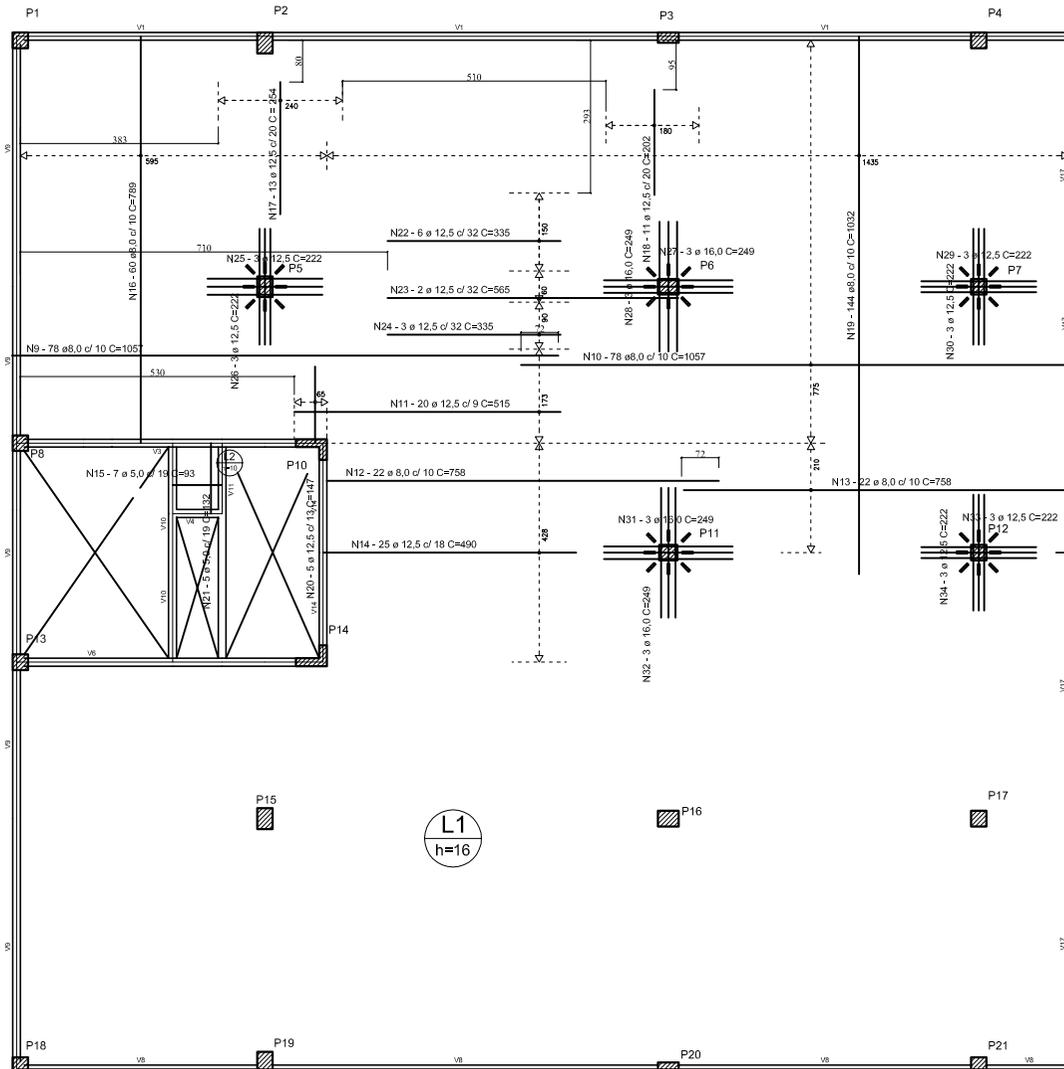


Comercial Rubi

Laje lisa maciça h = 16 cm - Armaduras positivas, para evitar a punção, colapso progressivo

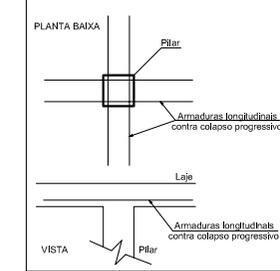
Prancha 2/3

Sem escala.

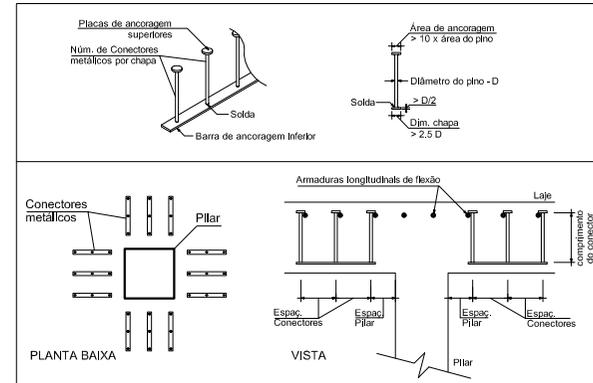


ARMADURA DE PUNÇÃO								
Quant.	Dim. chapa (cm)	Característica dos conectores					Quant. por chapa	Quant. total
		Aço	Diam. (mm)	Comp. (cm)	Espaç. Pilar (cm)	Espaç. Conectores (cm)		
64	21,5x2,5	CA25	6,3	13,6	6,5	9,5	3	192

DET. DA ARMADURA CONTRA COLAPSO PROGRESSIVO



DETALHE DA ARMADURA DE PUNÇÃO



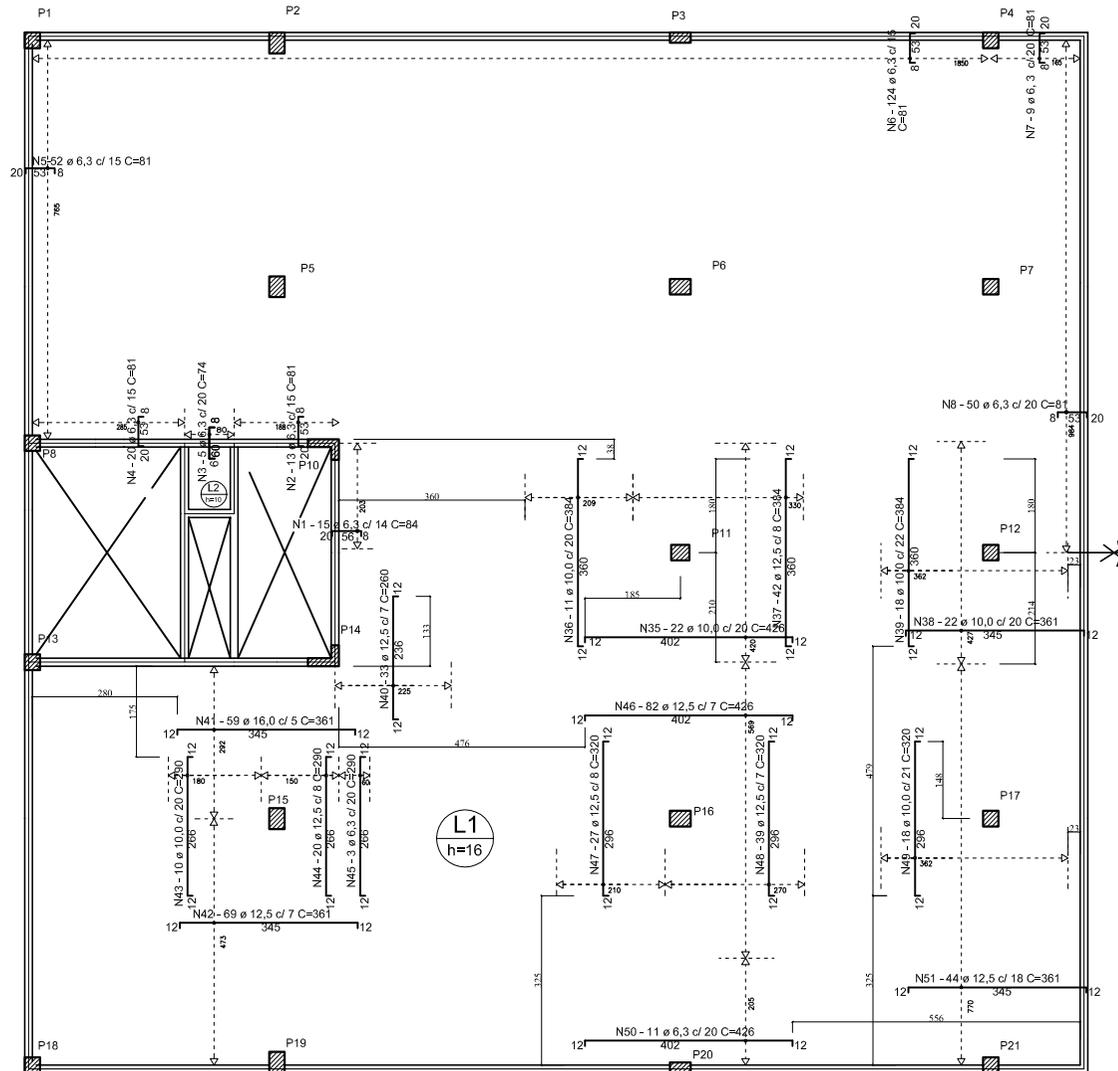
OBS: Armaduras dispostas de modo simétrico.

Comercial Rubi

Laje lisa maciça h = 16 cm - Armaduras negativas e de borda

Prancha 3/3

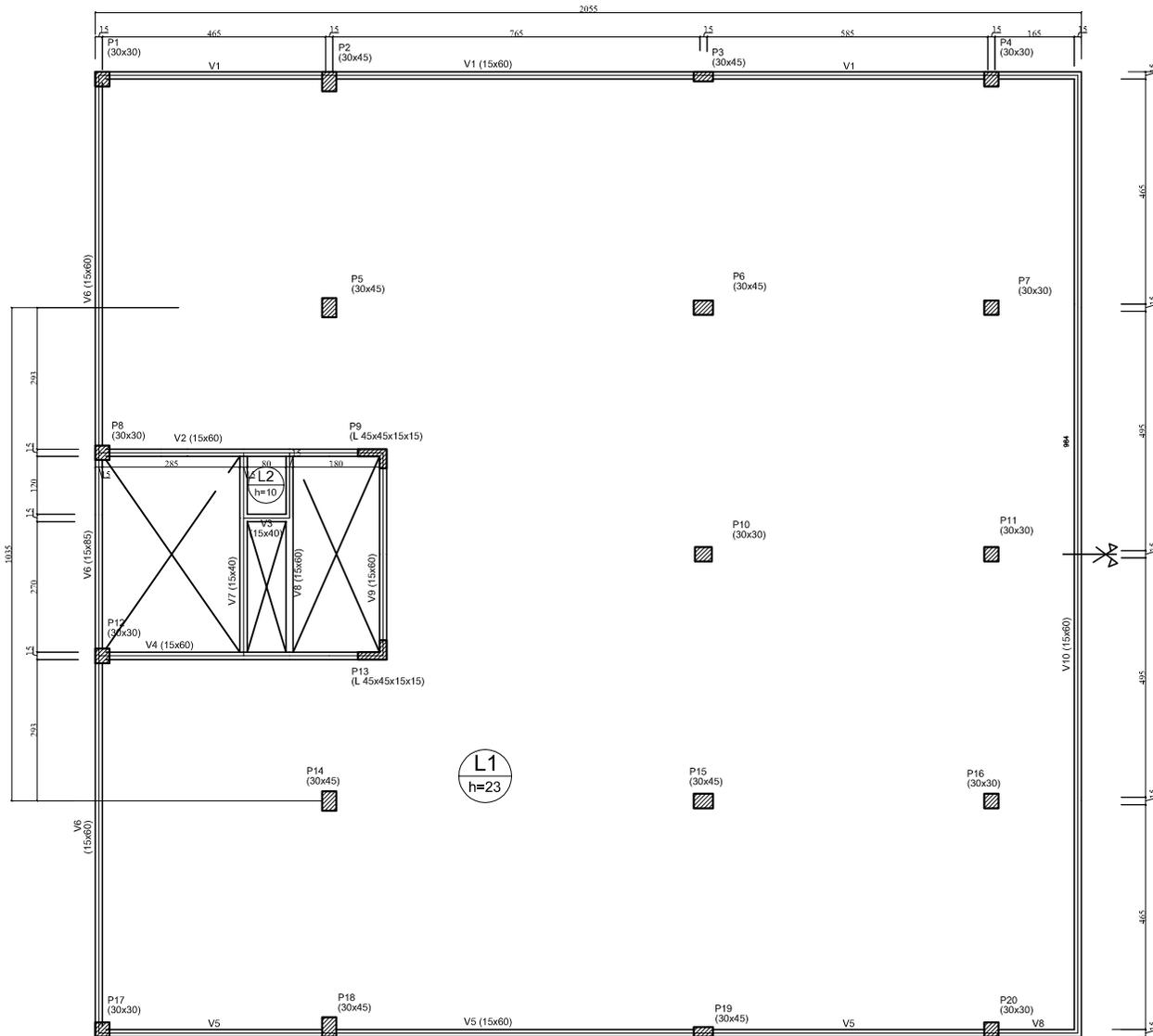
Sem escala.



OBS: Armaduras dispostas de modo simétrico.

Comercial Rubi
Laje lisa maciça h = 23 cm - FÔRMAS

Prancha 1/3
Sem escala.

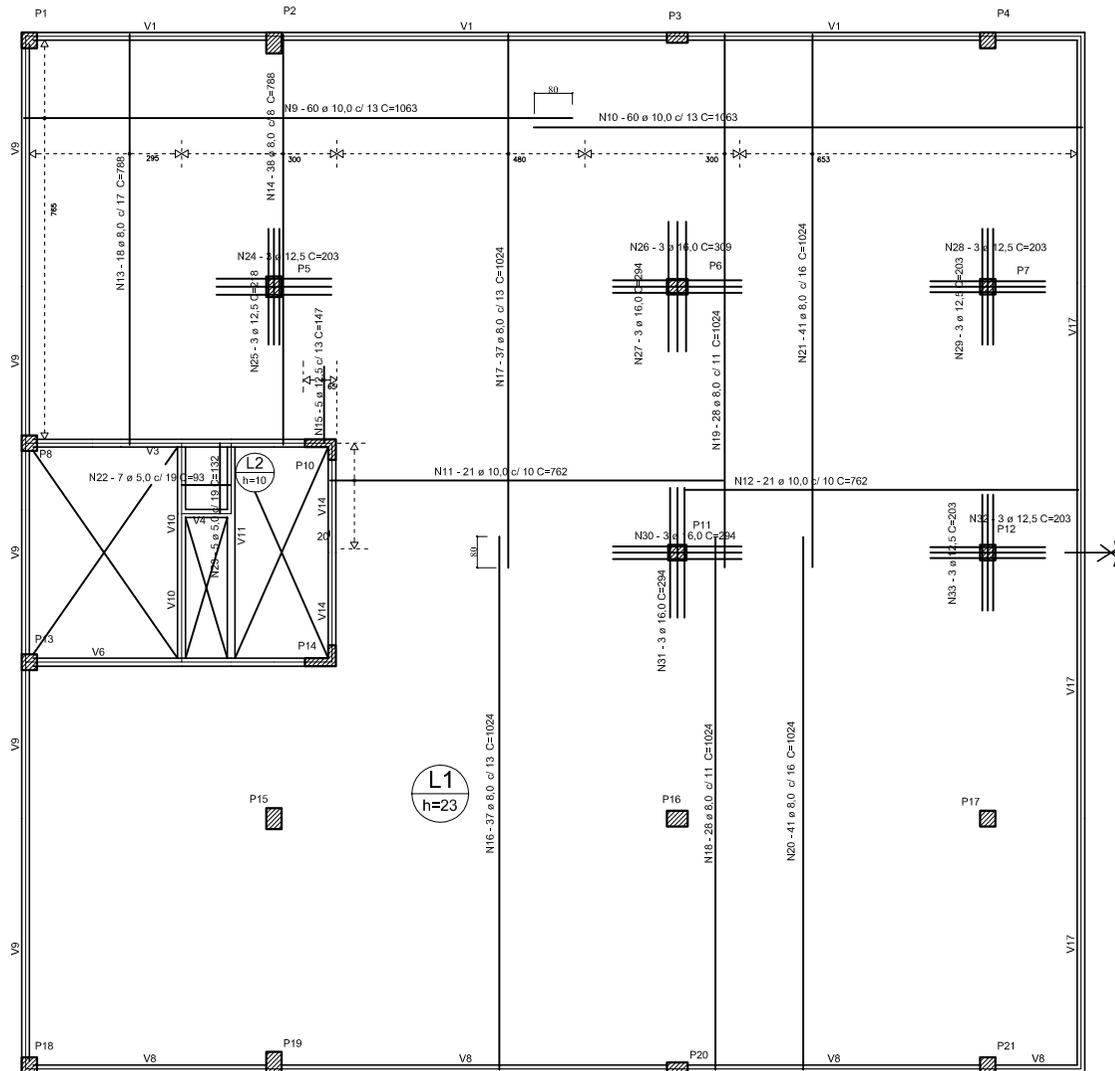


Comercial Rubi

Laje lisa maciça h = 23 cm - Armaduras positivas e para evitar punção e colapso progressivo

Prancha 2/3

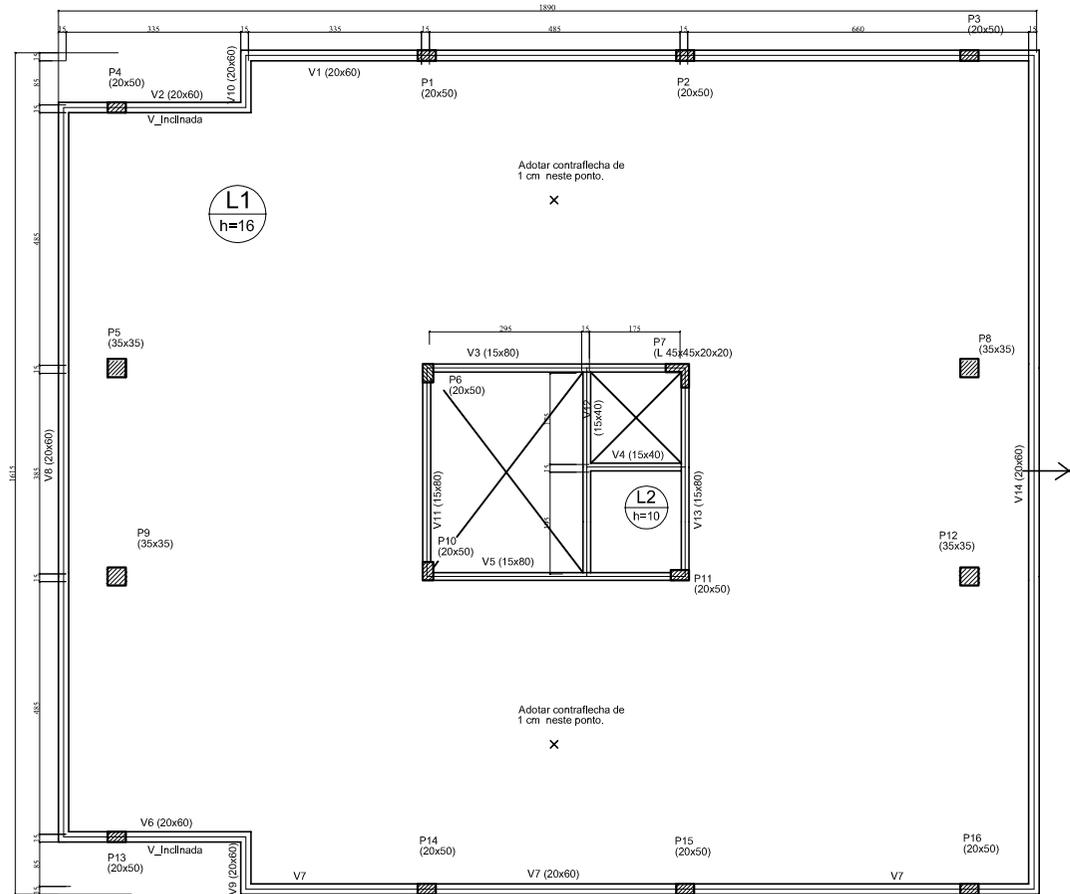
Sem escala.



OBS: Armaduras dispostas de modo simétrico.

Comercial Maranello
Laje lisa maciça h = 16 cm - Fôrmas

Prancha 1/3
Sem escala.

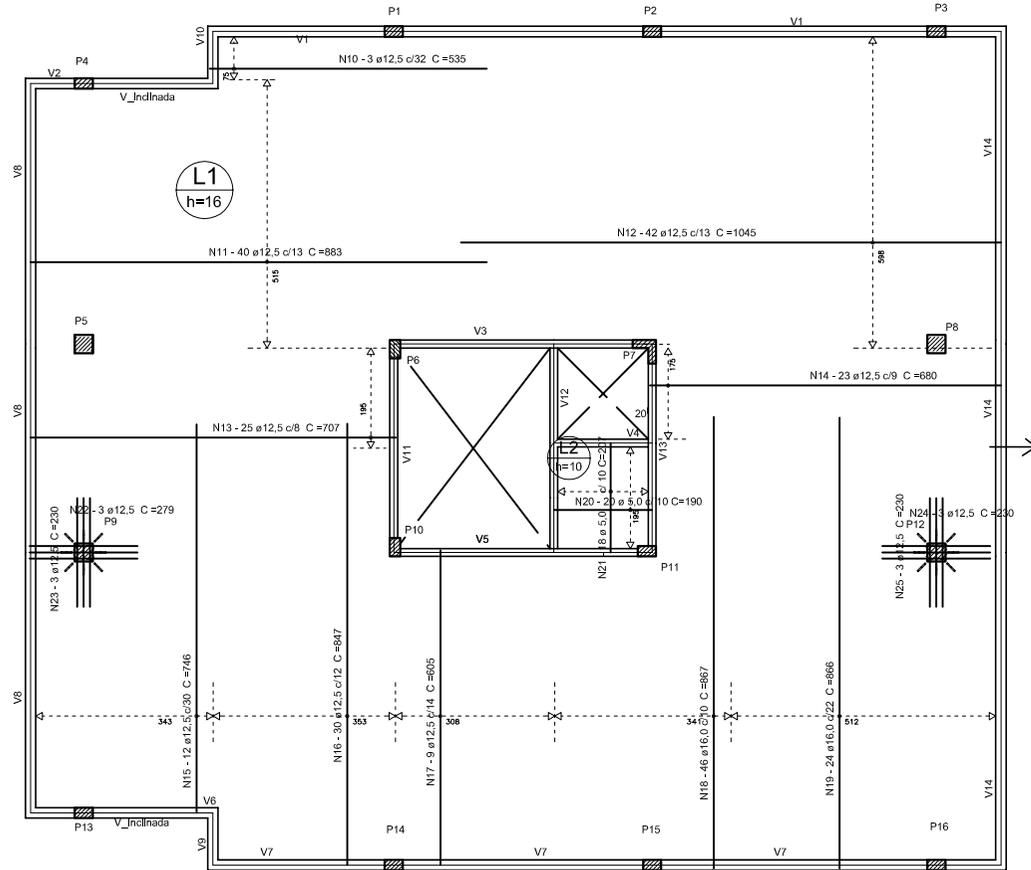


Comercial Maranello

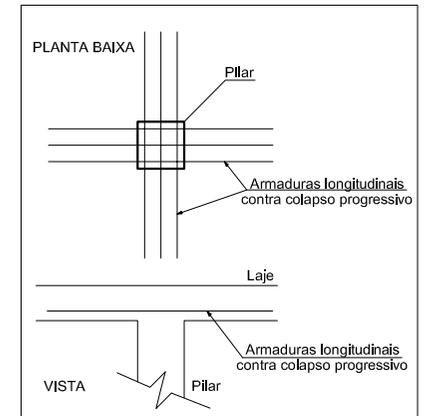
Laje lisa maciça h = 16 cm - Armaduras positivas, para evitar a punção, colapso progressivo

Prancha 2/3

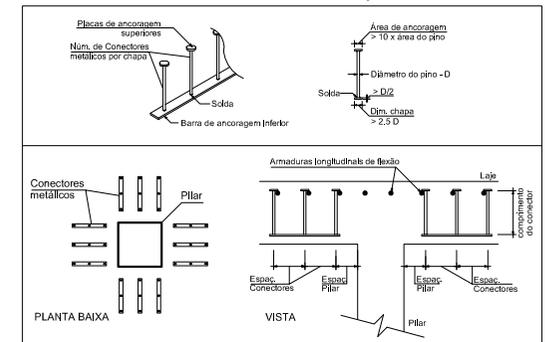
Sem escala.



DET. DA ARMADURA CONTRA COLAPSO PROGRESSIVO



DETALHE DA ARMADURA DE PUNÇÃO



Quant.	Dim. chapa (cm)	ARMADURA DE PUNÇÃO						Quant. por chapa	Quant. total
		Característica dos conectores				Espaç. Conectores (cm)	Espaç. Pilar (cm)		
		Aço	Diam. (mm)	Comp. (cm)	Espaç. Pilar (cm)				
32	21.5x2,5	CA25	6,3	13,6	6	9,5	3	96	

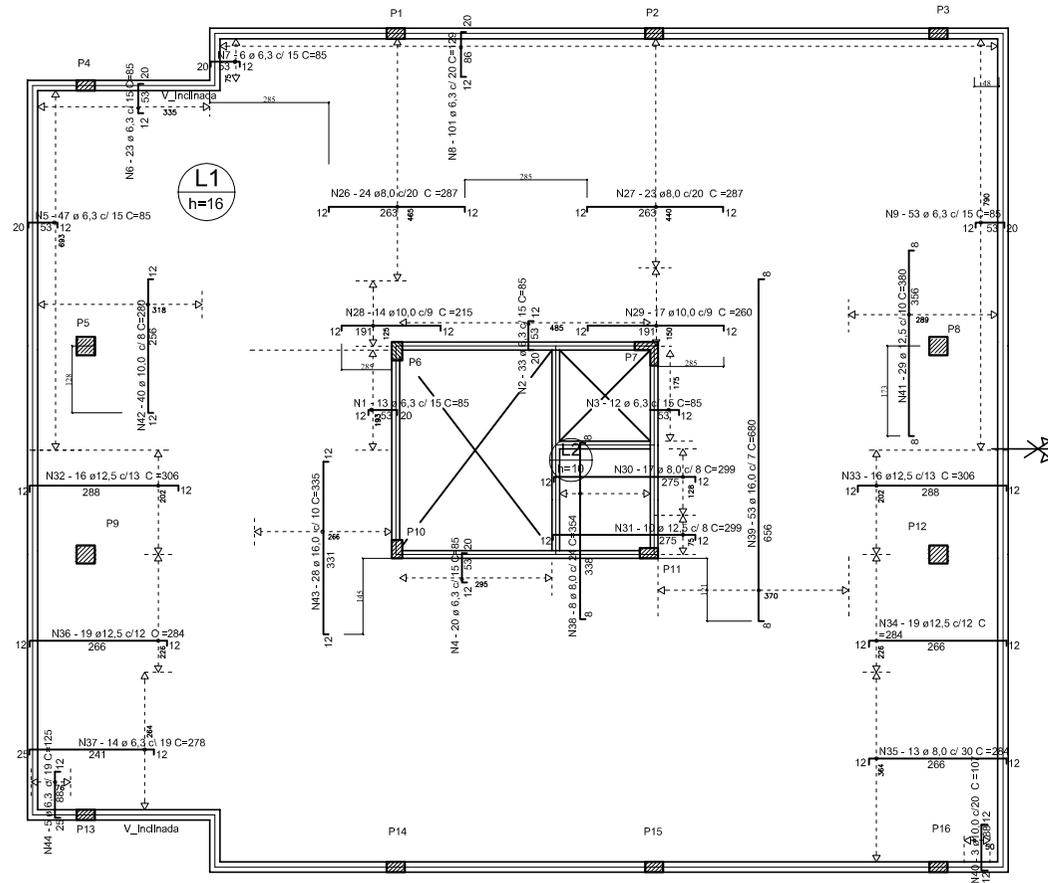
OBS: Armaduras dispostas de modo simétrico.

Comercial Maranello

Laje lisa maciça h = 16 cm - Armaduras negativas e de borda

Prancha 3/3

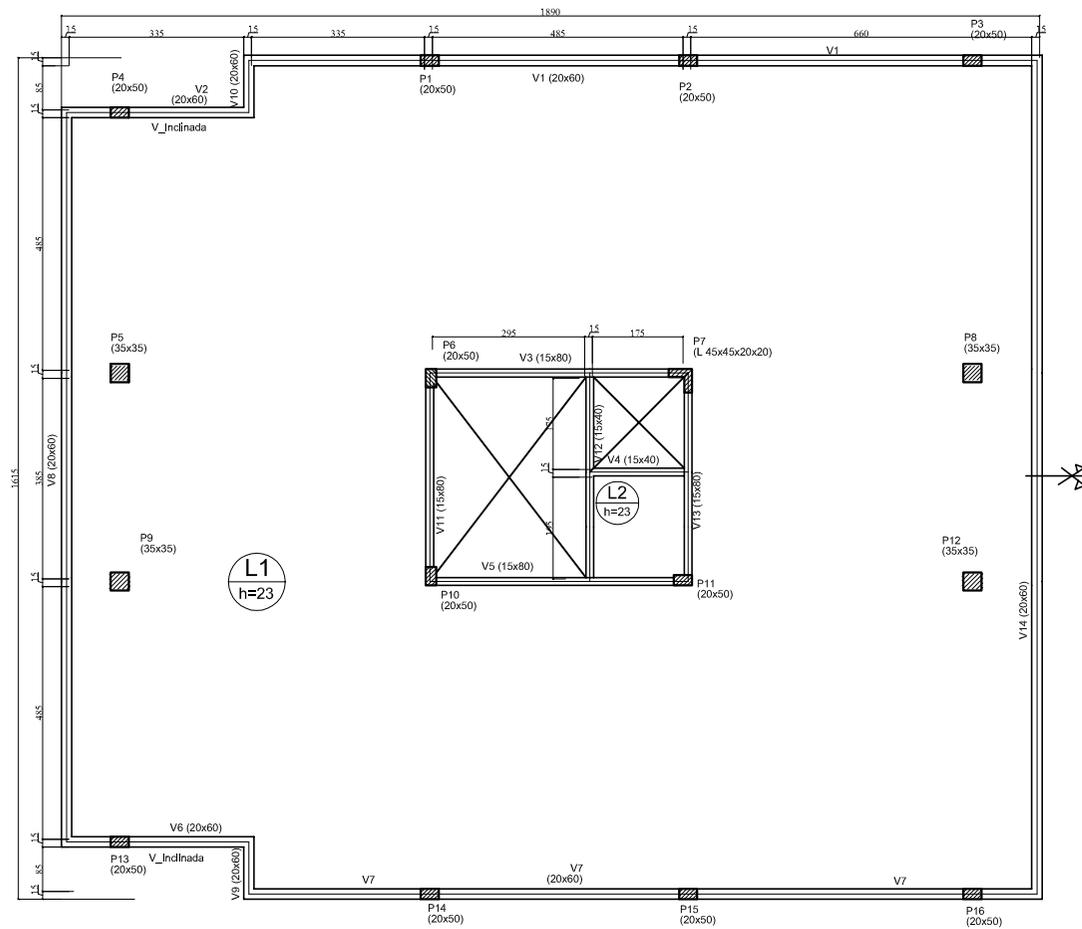
Sem escala.



OBS: Armaduras dispostas de modo simétrico.

Comercial Maranello
Laje lisa maciça h = 23 cm - Fôrmas

Prancha 1/3
Sem escala.

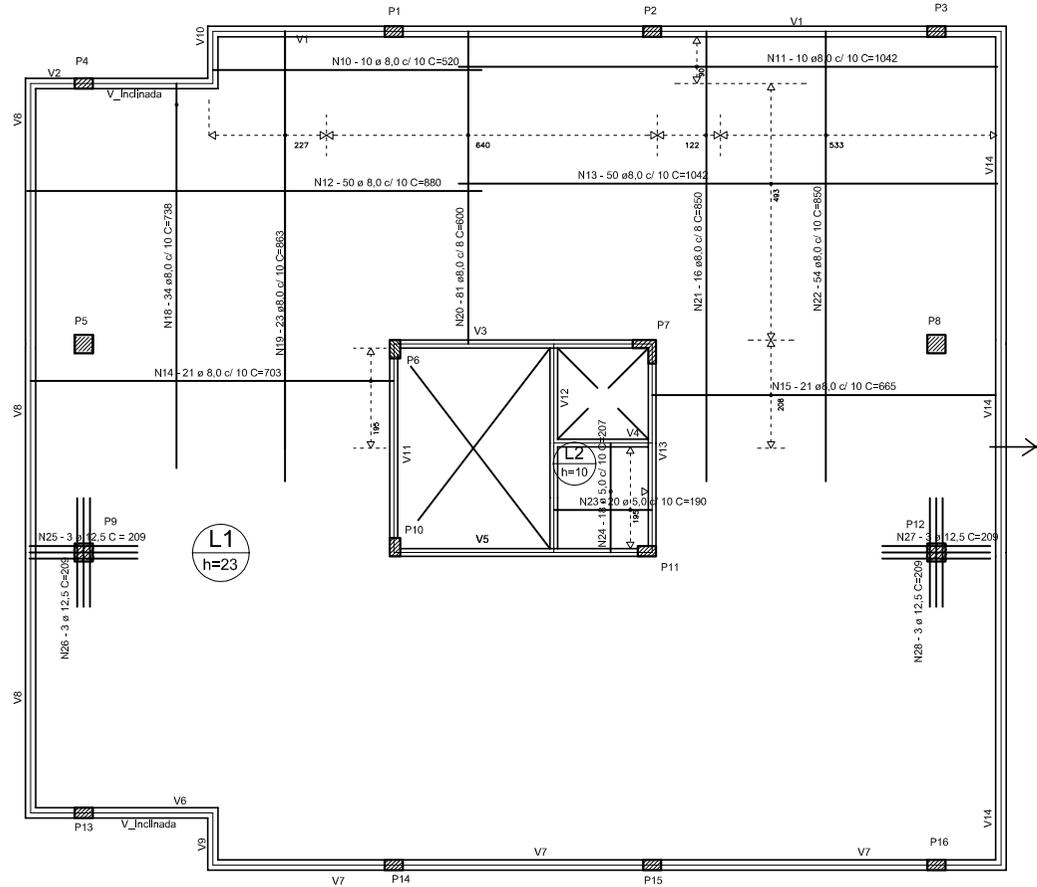


Comercial Maranello

Laje lisa maciça h = 23 cm - Armaduras positivas, para evitar a punção e o colapso progressivo

Prancha 2/3

Sem escala.



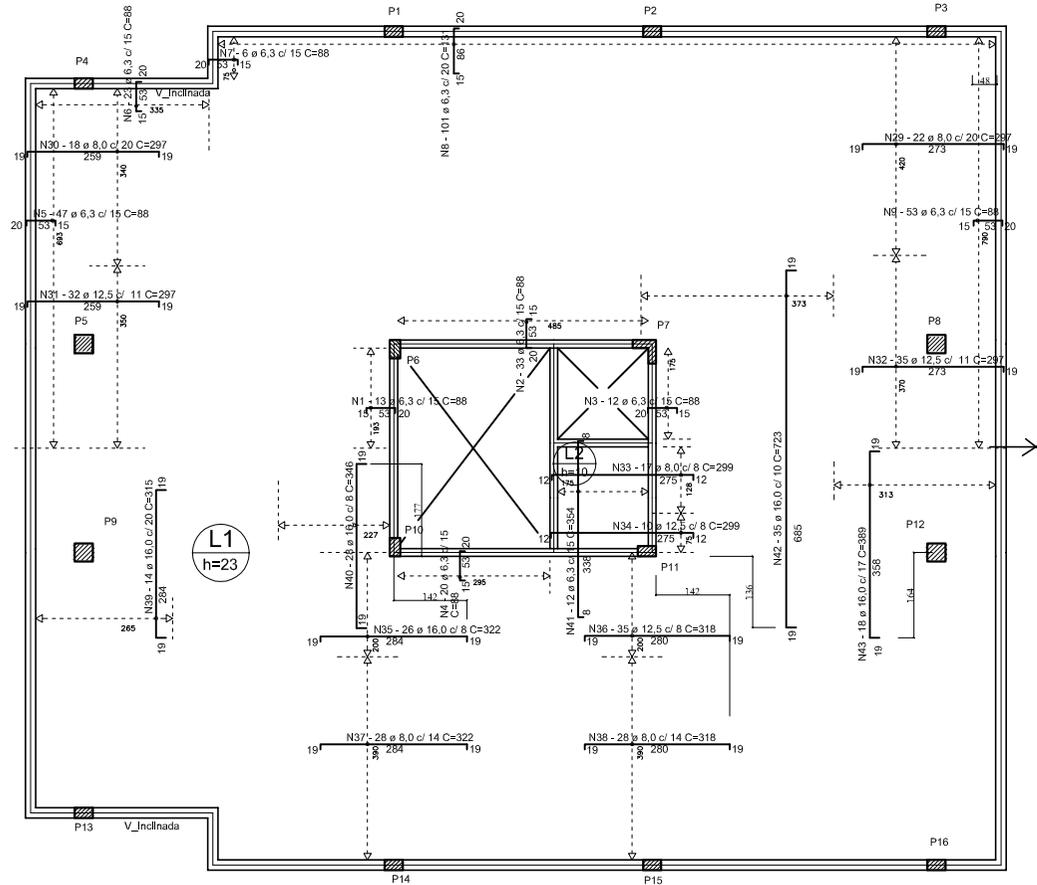
OBS: Armaduras dispostas de modo simétrico.

Comercial Maranello

Laje lisa maciça h = 23 cm - Armaduras negativas e de borda

Prancha 3/3

Sem escala.



OBS: Armaduras dispostas de modo simétrico.

7.2 ALTERNATIVA 2 – LAJE LISA NERVURADA COM CUBETAS

As lajes nervuradas podem ser consideradas um melhoramento das lajes maciças, pois substituem parte do concreto tracionado por elementos inertes. Desta maneira, existe a possibilidade de vencer grandes vãos, pois a mesa atua na compressão e, embora ocorra um pequeno aumento no volume de concreto para constituir as nervuras, pode-se afirmar que tanto o concreto quanto o aço são mais bem aproveitados. O melhor aproveitamento do concreto deve-se à maior inércia da seção e a redução do consumo de aço deve-se à maior contribuição do concreto.

Verifica-se que, para vãos grandes (da ordem de 6 metros), as lajes maciças começam a onerar o sistema construtivo, porque o consumo de material aumenta demasiadamente, uma vez que para atender aos limites de deformações excessivas faz-se necessária grande inércia, então a altura da seção transversal da laje é aumentada.

A maior parte do concreto existente nesta seção está submetido aos esforços de tração, e não colabora ao acréscimo de resistência do elemento estrutural, apenas atua no cobrimento da armadura de flexão e aumenta o peso próprio. Uma redução de peso próprio possibilita alcançar um vão maior. Daí a intenção de eliminar parte do concreto desta região tracionada por vazios ou elementos inertes, viabilizando as lajes nervuradas.

Araújo (2010, v. 2) expõe que é possível adotar a solução de lajes nervuradas para reduzir o peso próprio da estrutura pois, nestas lajes, a zona de tração é constituída por nervuras. As nervuras são formadas pela inserção de materiais leves (para fins de redução de peso próprio e tornar a superfície externa plana), ou de fôrmas industrializadas (principalmente polipropileno) que deixam à mostra as nervuras da laje. Tais fôrmas para lajes nervuradas são conhecidas por cubetas e podem ser fornecidas por diversas empresas, tais como ATEX, ASTRA, IMPACTO, FORMPLAST, ULMA, entre outras. Usualmente são projetadas para vãos de até 15 x 15 m.

Na alternativa de laje lisa nervurada, podem ser usadas cubetas, que são reaproveitáveis e servem de fôrmas. Suas laterais compõem a superfície da nervura e servem de apoio ao escoramento, simplificando e racionalizando a execução. Esta alternativa necessita de uma pequena quantidade de recortes, o que aperfeiçoa a execução. Tem poucas vigas, daí a grande vantagem desta solução: a liberdade em definir o traçado das paredes, dando maior flexibilidade ao projeto. É uma alternativa

muito competitiva quando o tempo de execução é uma variável importante em determinado projeto. Quando comparado com a alternativa convencional, esta opção mostra que para um mesmo número de operários é necessário menor tempo para finalizar a execução.

A Figura 11 destaca o uso da tecnologia nervurada. Trata-se de uma casca em concreto armado aliviada com o emprego de enchimento em EPS, aplicada na obra do Centro de Convivência do Idoso, no município de Treze de Maio (SC).

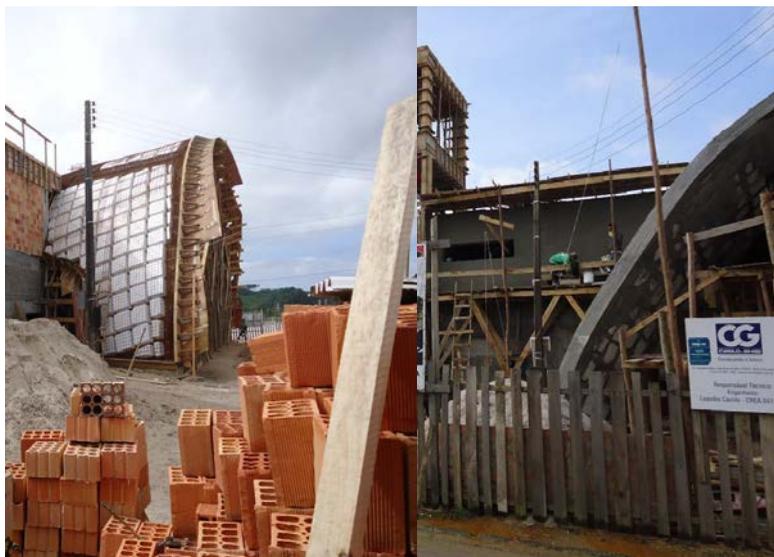


Figura 11 – Casca nervurada em concreto armado: Centro de Convivência do Idoso (Treze de Maio – SC)

Uma desvantagem é a necessidade de se ter uma maior altura no pavimento e conseqüente maior altura da edificação, o que pode ser um fator limitante em determinadas situações onde, por exemplo, a altura máxima da edificação é restringida por leis municipais.

A alternativa de pavimento constituído por laje nervurada com cubetas apresenta resultados semelhantes daquela com enchimento de EPS, por isso apenas estuda-se a alternativa com cubetas, pois se considera que sejam variações muito similares de uma mesma tecnologia. As principais mudanças percebem-se na modulação (distâncias entre elementos seguindo padrões pré-fixados) e no acabamento, visto que a tecnologia com EPS permite o uso de fixadores

que possibilitam o reboco, enquanto para a outra deve ser executado forro.



Figura 12 - Laje lisa nervurada no Floripa Shopping / Florianópolis (SC) (Fotografia em 05/agosto/2012)

Podem ser armadas em uma ou em duas direções. Quando armadas em duas direções, podem ser usadas treliças metálicas e então complementar a armadura das nervuras transversais pela inserção de barras de aço.

I) Critérios para projeto

- a) É boa prática evitar a necessidade de armadura de cisalhamento nas nervuras, pois estas exigem maiores cuidados nas concretagens e aumentam a mão-de-obra. Prefere-se, por tal motivo, usar regiões maciças (engrossamentos).
- b) engrossamentos e faixas maciças podem ser úteis para corrigir os efeitos da modulação e inserir regiões mais rígidas, auxiliando no controle das deformações excessivas.

c) uma prática comum em escritórios de projeto é calcular o projeto com duas ou três opções de dimensões das cubetas e então escolher como definitiva aquela que minimiza o custo.

d) o item 13.2.4.2 da NBR6118/2007 prescreve que, para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 e 110 cm, exige a verificação das nervuras como se fossem vigas e permite essa verificação como lajes se o espaçamento entre eixos de nervuras for até 90 cm e a largura média das nervuras for maior que 12 cm. No caso da necessidade de mão-de-obra para a confecção e posicionamento dos estribos em cada nervura é um indicativo de que outras opções de cubetas devem ser analisadas, pois a complexidade que decorre do uso destes estribos são significativas.

e) sobre o cisalhamento das nervuras junto ao apoio, cabe ressaltar que o programa computacional arma alguns pontos localizados, principalmente junto a elementos de maior rigidez. Nestas situações, admite-se realizar procedimentos manuais e corrigir as tensões de cisalhamento, adequando as armaduras para uma situação mais realista. Alguns projetistas usam a média ao longo do comprimento total da viga de apoio. Adotou-se o critério de usar a média a cada 3 barras (que representam as nervuras), comparar com as tensões resistentes e (τ_{Rd2}), se necessário, adotar estribos para esta nova situação. Comumente verifica-se que o mesmo efeito ocorre se usado o Método dos Elementos Finitos.

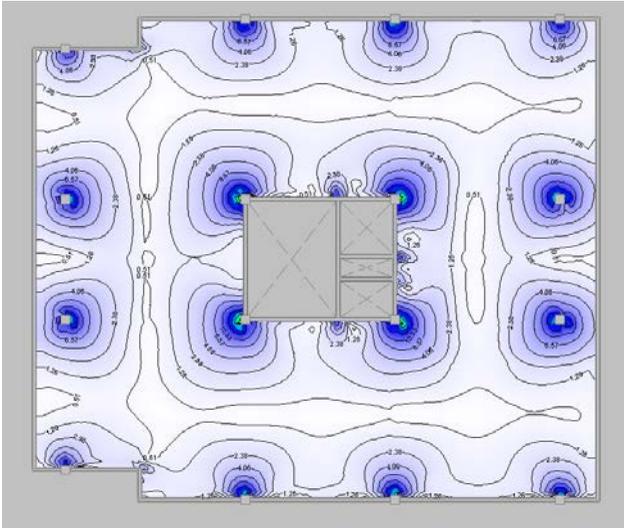


Figura 13 – Esforços cortantes para o Comercial Maranello, processamento em CypeCAD.

A Figura 13 mostra picos de tensão ocorridos quando usado o Método dos Elementos Finitos.

Em termos executivos, é preferível empregar lajes nervuradas com cubetas a adotar lajes lisas maciças pelas vantagens de custos advinda da possibilidade de alugar as fôrmas. Este sistema apresenta pequena quantidade de recortes, o que acelera a execução.

Tem poucas vigas, daí a grande vantagem desta solução: a liberdade em definir o traçado das paredes, dando maior flexibilidade ao projeto.

II) Desenvolvimento para o Edifício Comercial Rubi

a) Para os engrossamentos, a NBR6118/2007 recomenda que a dimensão mínima em cada direção, medida a partir do centro do pilar, seja de $1/6$ do vão correspondente. Para o Comercial Rubi, a laje de espessura de aproximadamente 30 cm exige que este engrossamento possua dimensões ainda maiores, visto que o programa computacional requer um comprimento de $3*d$ a partir da face do pilar para verificar a

punção no contorno situado à distância d depois da última linha de conectores;

b) esta alternativa traz a grande vantagem de aprimorar a distribuição de paredes sobre as lajes, o que tem grande aplicabilidade para edifícios comerciais. Por este motivo, no Comercial Rubi, é definida uma carga distribuída para considerar as paredes internas de valor $3,0 \text{ kN/m}^2$. Esta carga é obtida considerando-se uma área de influência que abrange a região demasiadamente carregada de paredes: onde há circulação e muitas das divisórias internas;

c) junto ao P14 (canto da caixa de elevador) há um pico de tensão. Admite-se que tal pico tenha sua tensão reduzida em 15% devido aos efeitos de analogia de grelha, para corrigir o resultado de armadura deste local;

d) o processamento de pórtico espacial com grelha equivalente considera a influência da deformação das vigas de apoio na grelha da laje. Pôde ser verificada simetria nos resultados de armaduras para lajes, o que significa que os efeitos de deslocamentos globais não são significativos a ponto de exigir mais armadura num elemento que naquele simetricamente oposto. Mesma consideração aplica-se ao projeto do Comercial Maranello;

e) para grandes momentos fletores negativos, como aquele entre as lajes L6 e L10, o comprimento da armadura pelo detalhamento advindo do uso da Analogia de Grelhas resulta pouco superior ao dobro do comprimento encontrado pelo uso das Tabelas de Bares. Tal divergência deve-se ao fato que o comprimento da armadura usando as tabelas baseia-se no comprimento efetivo do vão (define-se pelas condições de vinculação), enquanto que a Analogia de Grelhas define o comprimento a partir do diagrama de momentos fletores;

f) o método da Analogia de Grelhas permite a redução da armadura nas regiões de menores momentos fletores (detalhamento por faixas), conforme detalhe entre as lajes L7 e L11;

g) adotou-se a cubeta ATEX 600 / $22,5 + 7,5$, que corresponde a uma cubeta com dimensões de $12,5 \text{ cm}$ no topo da nervura, intereixo de 60 cm , altura de cubeta $22,5 \text{ cm}$, altura de capa $7,5 \text{ cm}$ e altura total 30 cm :

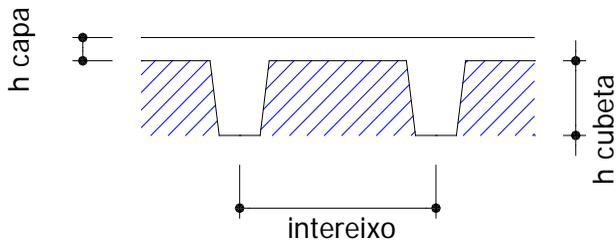
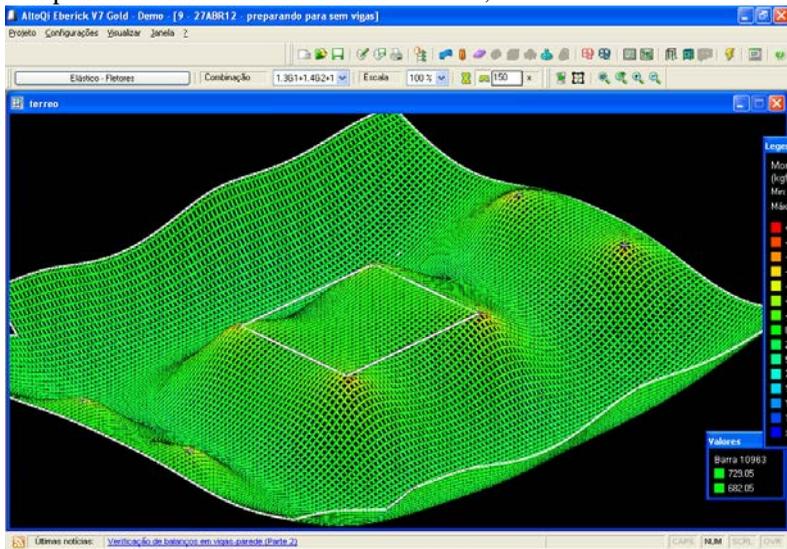


Figura 14 – Elementos geométricos de laje nervurada

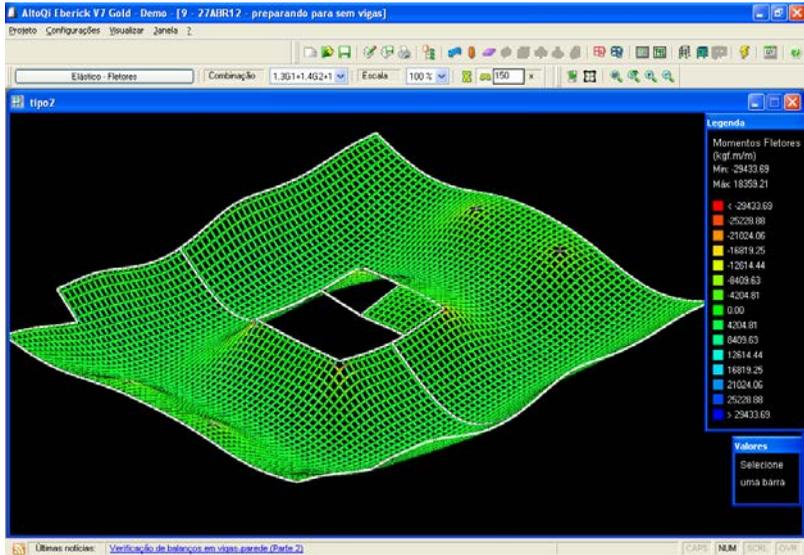
h) o Estado Limite de Serviço desta alternativa é verificado, resultando flecha de valor 1,54 cm, enquanto que o valor limite é 2,64 cm.

III) Desenvolvimento para o Comercial Maranello

a) Neste projeto, a caixa de escada fica no centro da edificação, então o algoritmo de reconhecimento dos contornos da laje faz necessário a introdução de uma viga fictícia, para não induzir a um modelo equivocado de grelha do pavimento, pois considera haver laje sobre a escada e não leva em conta a ligação entre as vigas da caixa de escada e a laje no modelo estrutural. Somado a isto, o programa não permite o uso de meia cubeta. Desta maneira, adota-se uma faixa maciça que torna a modulação adequada para a introdução das duas lajes e para compensar o efeito da falta da meia cubeta;



b) como solução para a questão de reconhecimento da laje, esta foi separada em duas pela inserção de uma viga chata de mesma rigidez que as barras da grade;



c) para as lajes lisas nervuradas, adotam-se capitéis maiores que aqueles de dimensões mínimas, a fim de adequar a modulação com o resto da estrutura;

d) adota-se a cubeta ATEX 600 / 32,5 + 7,5 cm, que corresponde a uma cubeta com dimensões de 12,5 cm no topo da nervura, entreixo de 60 cm, altura de cubeta 32,5 cm, altura de capa 7,5 cm e altura total 40 cm.

Vale ressaltar que a cubeta para o projeto do Comercial Rubi tem altura comercialmente disponível imediatamente inferior à cubeta do Comercial Maranello. Esta diferença admite-se pelo fato de que, em alguns lugares, o projeto do Comercial Maranello possui vãos pouco maiores e maior assimetria de cargas que o Comercial Rubi.

e) o Estado Limite de Serviço desta alternativa é verificado, resultando flecha de valor 1,91 cm, enquanto que o valor limite é 2,70 cm.

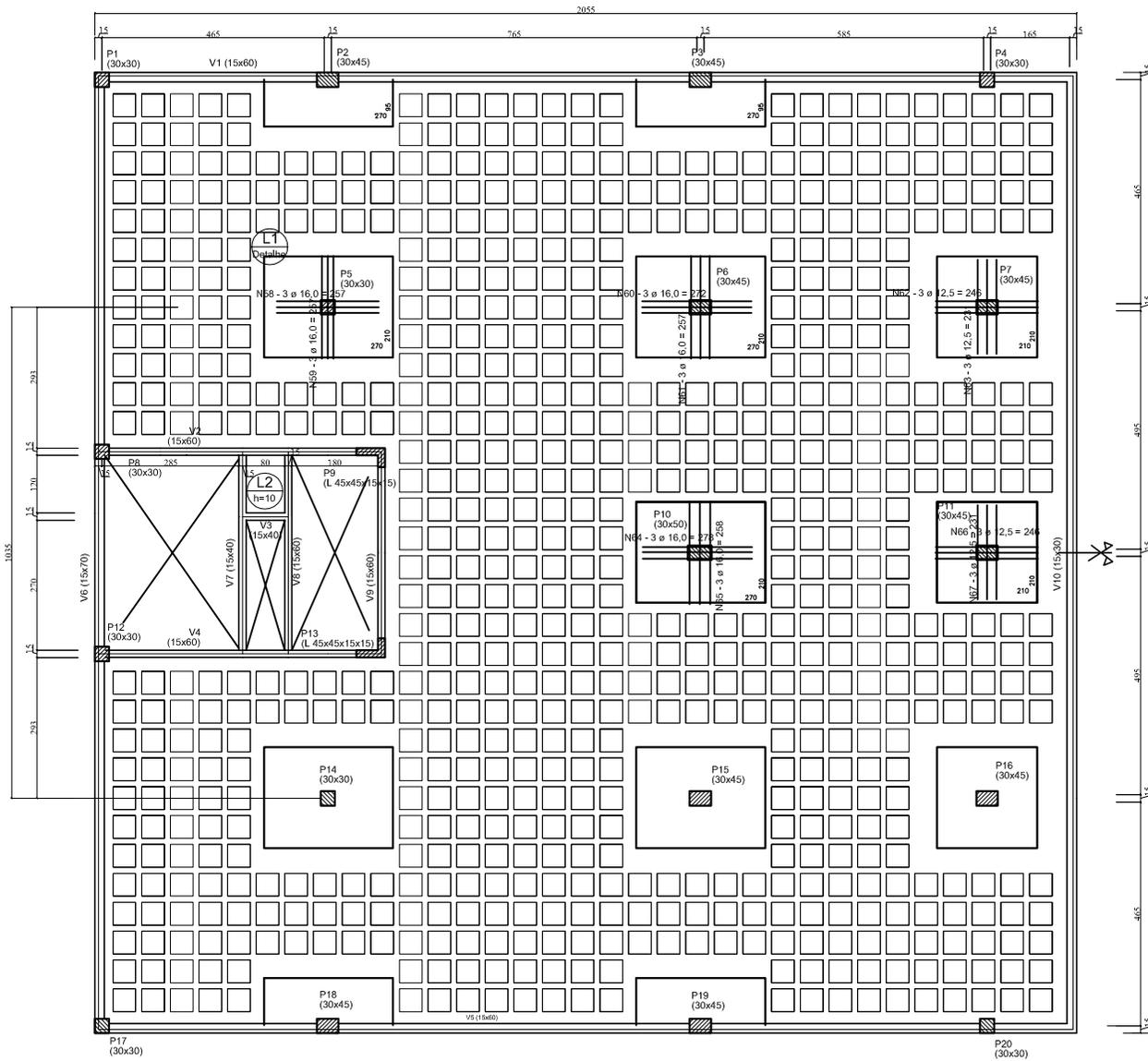
Seguem os projetos de fôrmas e armaduras.

Comercial Rubi

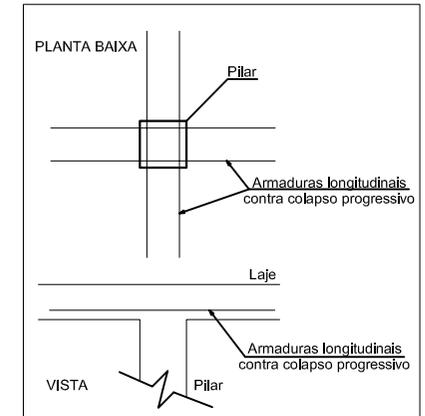
Laje lisa nervurada - Fôrmas e armadura para combater colapso progressivo

Prancha 1/3

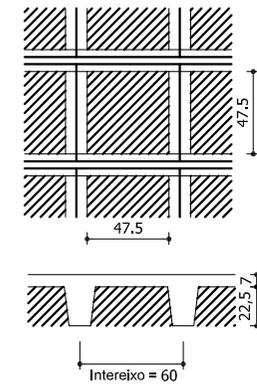
Sem escala.



DET. DA ARMADURA CONTRA COLAPSO PROGRESSIVO



Detalhe

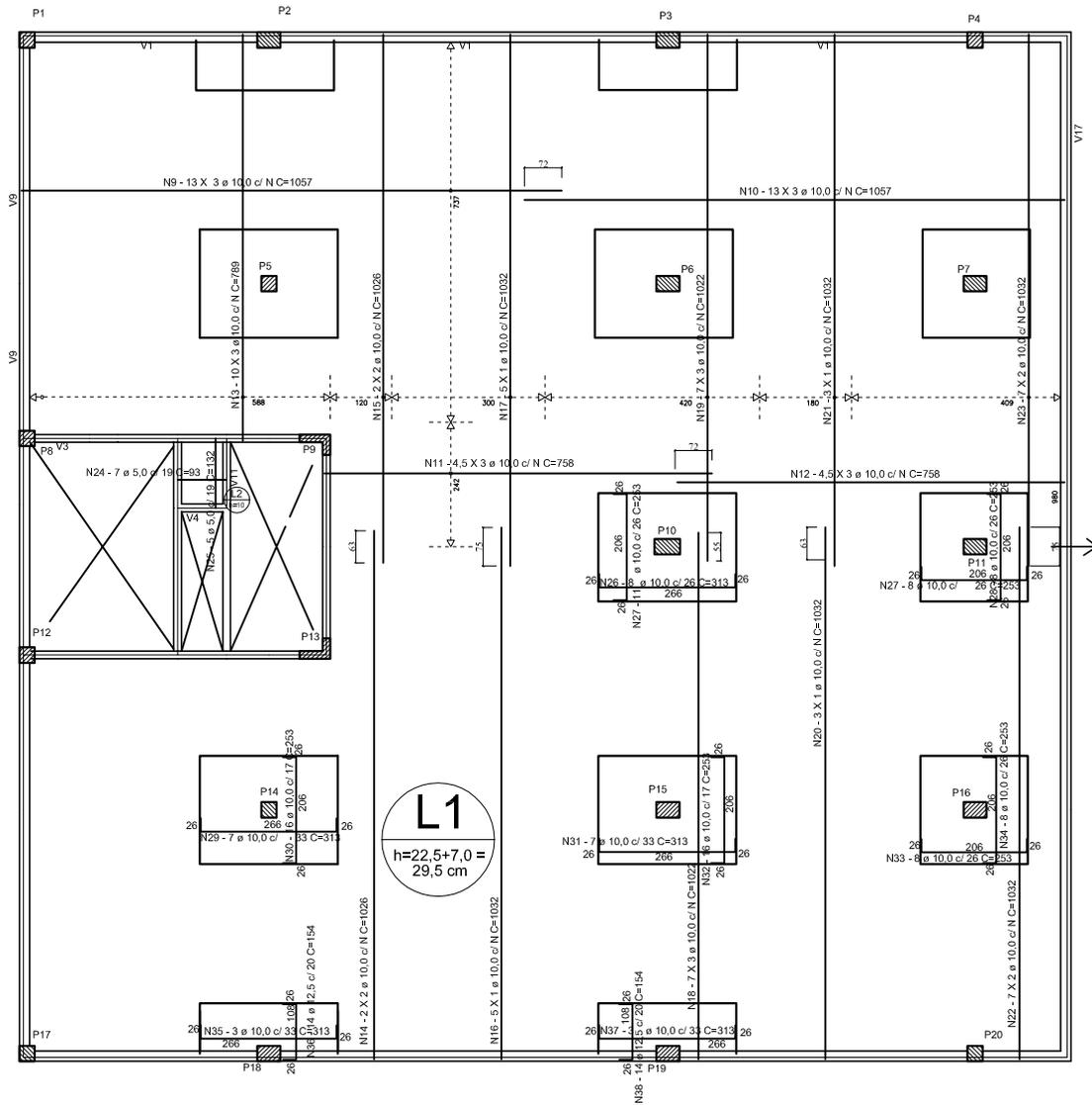


Blocos de enchimento					
Tipo	Nome	Dimensões(cm)			Quantidade
		hb	bx	by	
Atex 600 22.5	B22.5/60/60	22.5	60	60	746

Comercial Rubi

Prancha 2/3
Sem escala.

Laje lisa nervurada h = 22,5+7 = 29,5 cm - Armaduras positivas e para evitar a punção



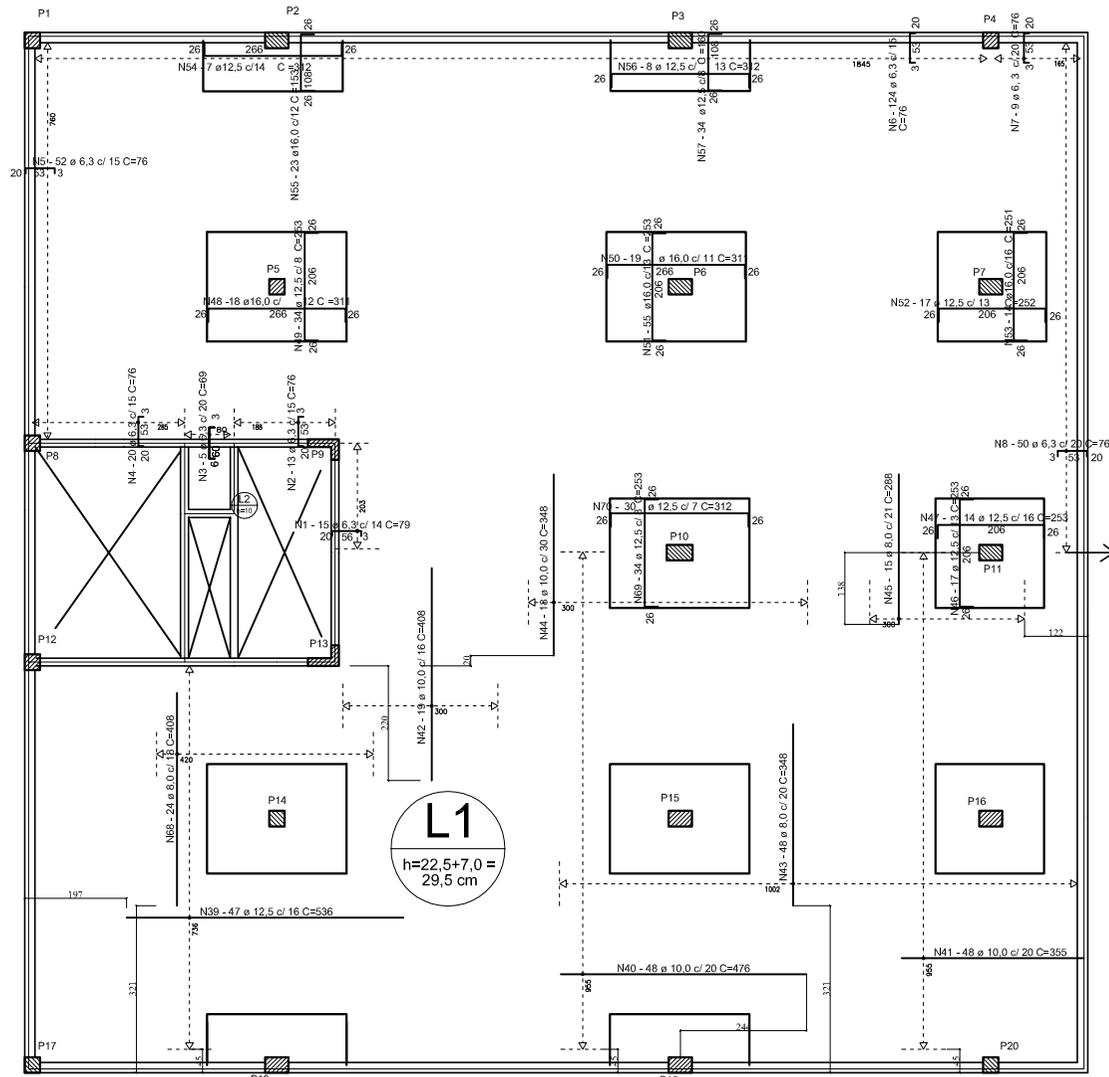
OBS: Armaduras dispostas de modo simétrico.

Comercial Rubi

Laje lisa nervurada h = 22,5+7 = 29,5 cm - Armaduras negativas

Prancha 3/3

Sem escala.



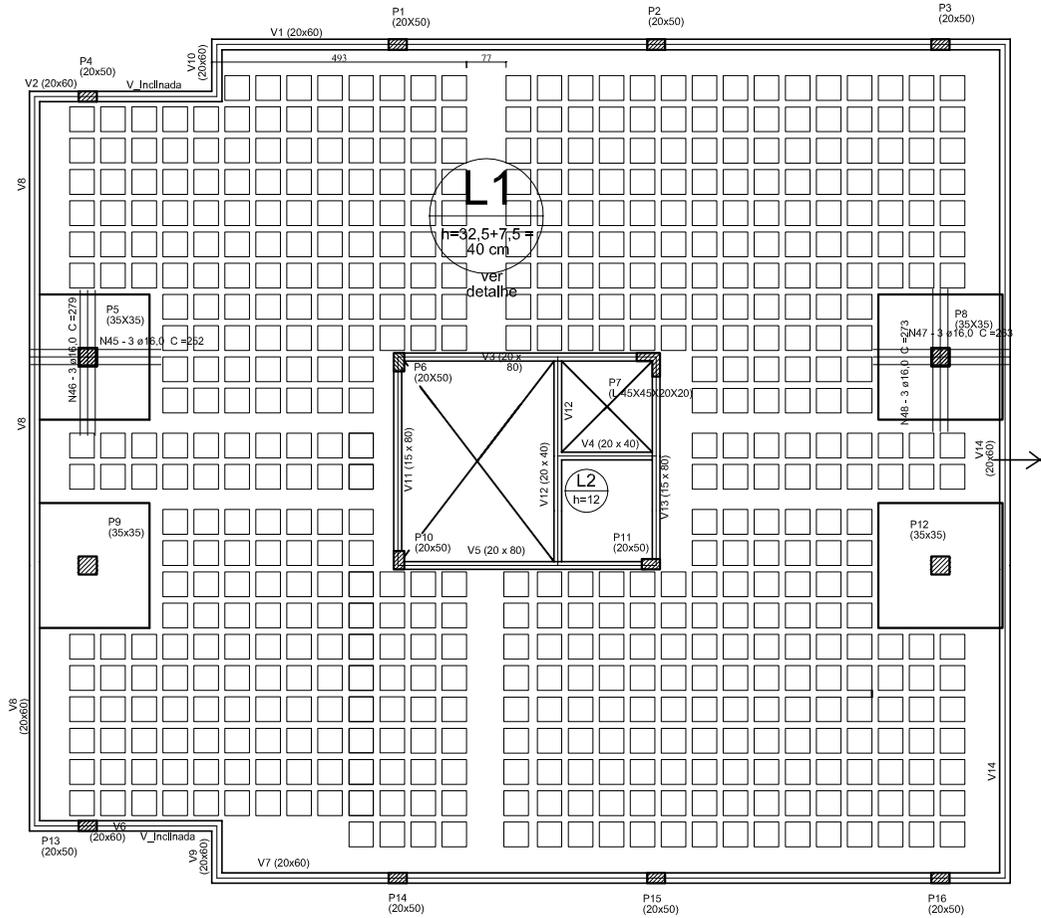
OBS: Armaduras dispostas de modo simétrico.

Comercial Maranello

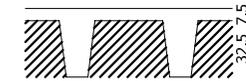
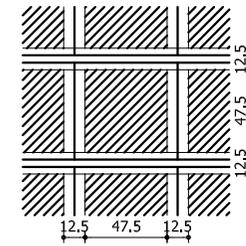
Laje lisa nervurada - ATEX 600 / 32,5 + 7,5

Prancha 1/3

Sem escala.



Detalhe



Blocos de enchimento					Quantidade
Tipo	Nome	Dimensões(cm)			
		hb	bx	by	
Atex 600 22.5	B32.5/60/60	32.5	60	60	555

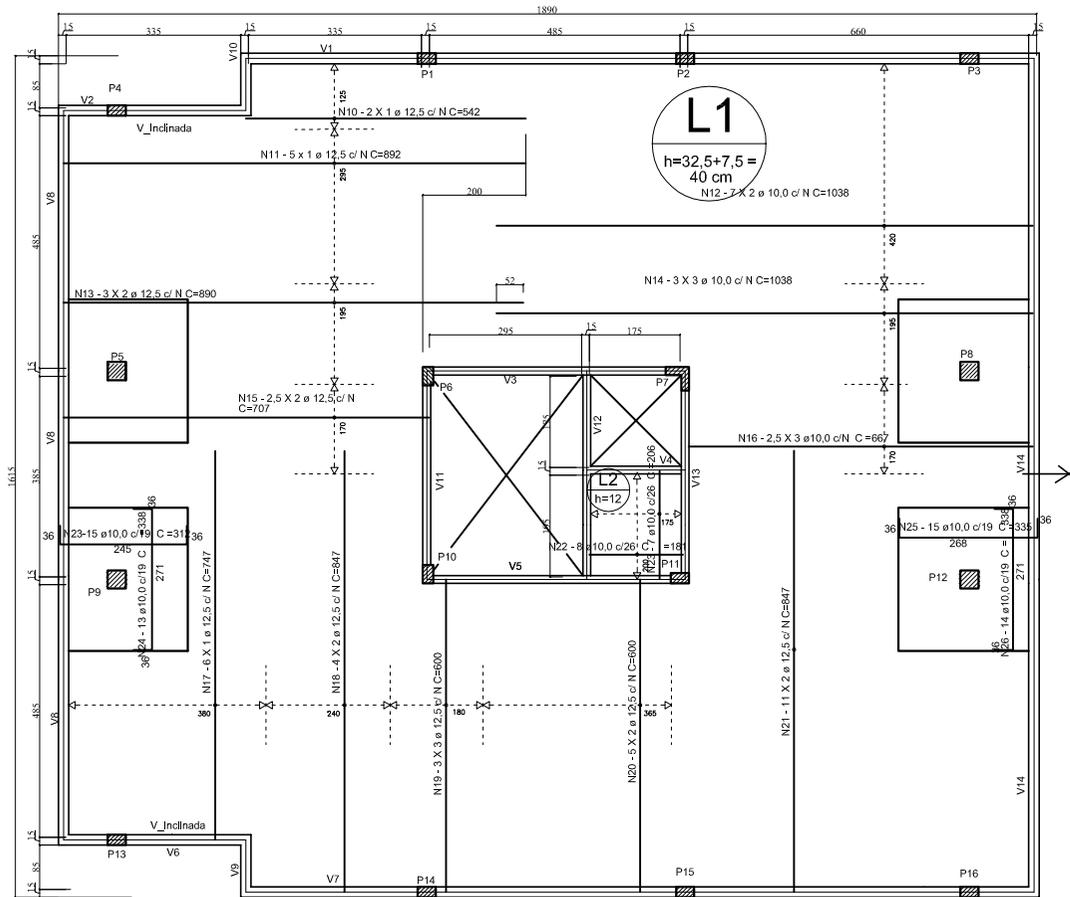
Comercial Maranello

Laje lisa nervurada - ATEX 600 / 32,5 + 7,5 cm

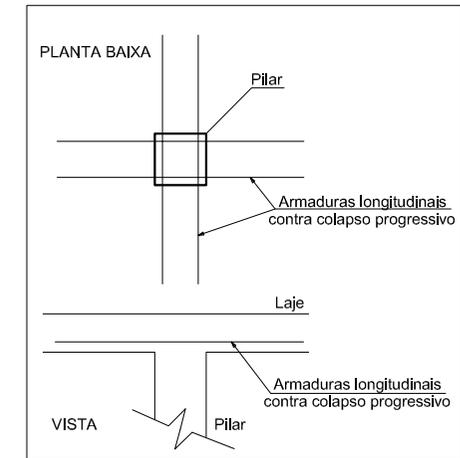
Armaduras positiva, para evitar a punção e o colapso progressivo

Prancha 2/3

Sem escala.



DET. DA ARMADURA CONTRA COLAPSO PROGRESSIVO



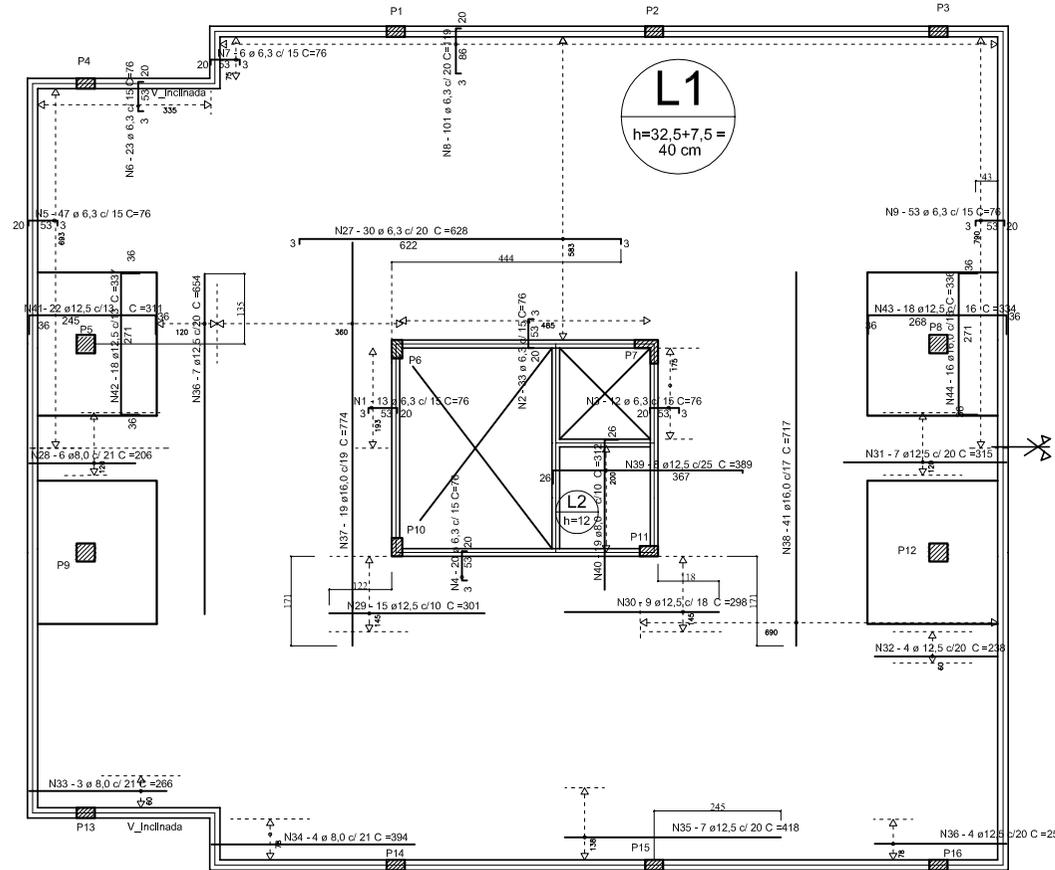
OBS: Armaduras dispostas de modo simétrico.

Comercial Maranello

Laje lisa nervurada - ATEX 600 / 32,5 + 7,5 cm
Armaduras negativas

Prancha 3/3

Sem escala.



OBS: Armaduras dispostas de modo simétrico.

7.3 ALTERNATIVA 3 – LAJE MACIÇA COM VIGAS

Por uma questão de uso consagrado em determinadas localidades, os pavimentos formados de lajes maciças com vigas são os mais tradicionais entre as soluções para pavimentos de edificações em concreto armado. Este fato justifica-se a algumas razões específicas, como por exemplo, ao conhecimento já difundido entre construtores e ao reaproveitamento de fôrmas quando há um grande número de repetições.

As vigas são lançadas conforme delimitação das bordas das lajes e juntamente com os pilares formam pórticos principais e secundários que tornam a estrutura como um todo mais rígida. Esta alternativa é conhecida por sistema convencional de laje-viga-pilar.

Para as lajes maciças, a solidarização existente entre as vigas e lajes implica na menor deformação das vigas. Comumente verifica-se que, para vãos de até 6 x 6 m, esta opção pode ser a mais viável em certos casos.

Estas lajes maciças são inicialmente calculadas considerando sua interação apenas com as lajes vizinhas, fazendo uso das tabelas de Bares disponíveis em Carvalho e Figueiredo (2005). São posteriormente calculadas por programa computacional, usando a Analogia de Grelhas e adotando-se a situação de maior armadura.

Albuquerque (1999) mostra que as fôrmas representam cerca de 30% do custo da estrutura. Este percentual varia conforme o tipo de solução adotada para o pavimento. As principais desvantagens deste sistema são o baixo aproveitamento do concreto, elevado peso próprio quando comparado com outros sistemas e a necessidade de executar um assoalho de madeira como fôrma da laje.

A discretização das lajes maciças como placas constituídas de concreto armado apoiadas em vigas é válida conforme o item 14.4.2.1 da NBR 6118/2007, porque as dimensões do comprimento e da largura são preponderantes em relação à espessura, e as ações atuam na direção da espessura.

As lajes maciças necessitam de fôrmas, sendo que um único jogo de fôrmas pode ser reaproveitado muitas vezes, principalmente quando os pavimentos se repetem igualmente. Esta mesma consideração também se aplica ao escoramento. O custo correspondente a tal etapa justifica parte da onerosidade da execução de lajes maciças, conforme explicam diversas literaturas.

O gasto com fôrmas que as lajes maciças apresentam é bastante reduzido quando usada a alternativa nervurada com cubetas.

I) Critérios para projeto

a) O uso de diferentes espessuras de lajes num mesmo pavimento deve ser evitado. Aconselha-se usar uma única espessura de laje para o pavimento todo. Caso as geometrias e magnitude de cargas sejam muito desuniformes, pode-se fazer uso de duas ou até, no máximo, três espessuras diferentes por pavimento;



Figura 9 - Estrutura de pavimento com lajes maciças apoiadas em vigas

b) para esta alternativa convencional, as vigas situam-se nas bordas, travando os pilares e abaixo das paredes. Os pilares estão dispostos formando pórticos principais e secundários;

c) para o Comercial Maranello, devido ao chanfro que ocorre na arquitetura, a concepção das vigas nas bordas fica prejudicada, então adota-se a solução de mão-francesa, para criar um apoio adicional.

II) Desenvolvimento

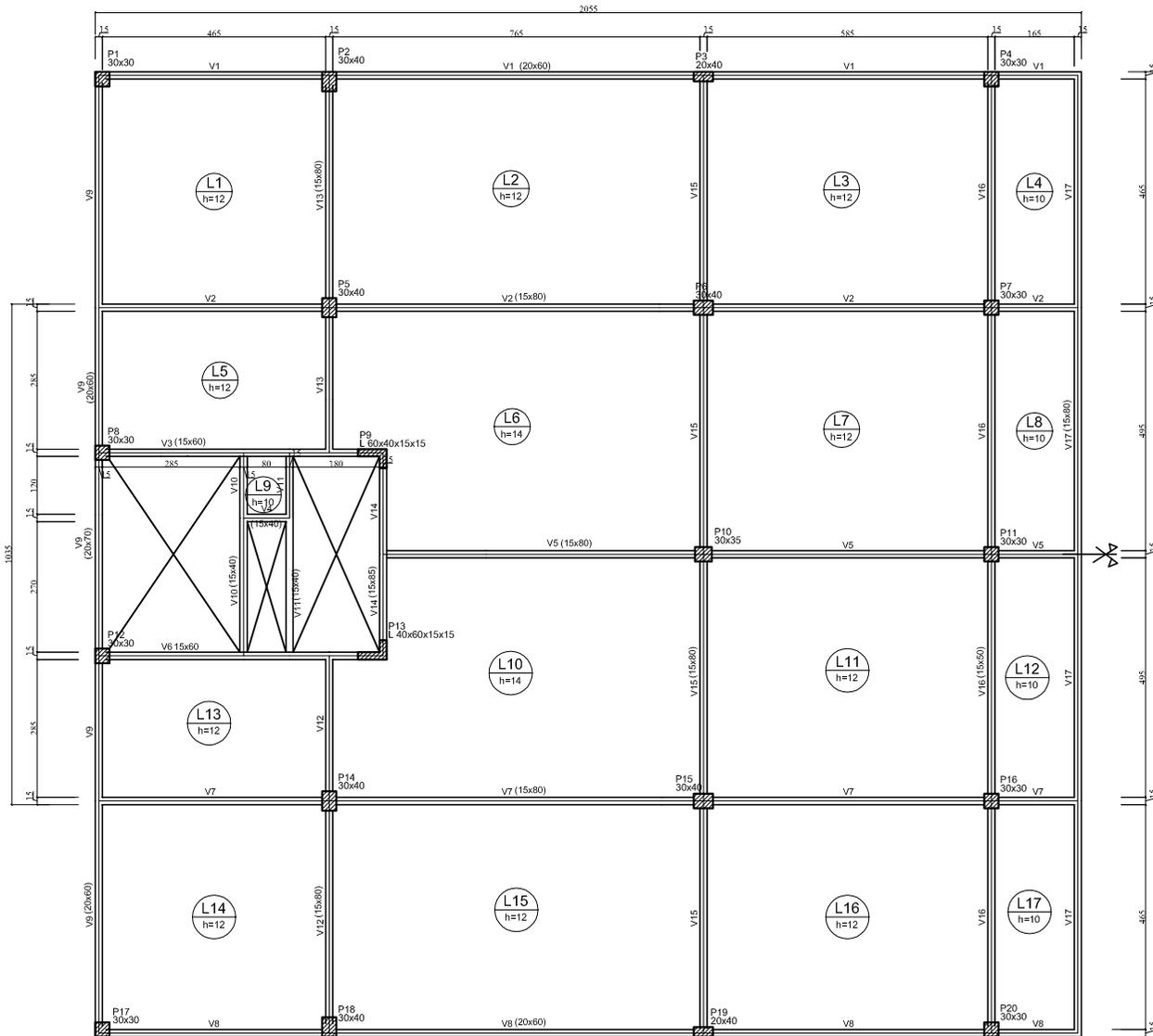
a) A planta de fôrmas para a solução usando as tabelas de Bares e para a Analogia de Grelhas é a mesma, ou seja, as dimensões dos elementos estruturais são mantidas.

b) o Estado Limite de Serviço desta alternativa é verificado, para o Comercial Rubi resulta flecha de valor 1,74 cm, enquanto que o valor limite é 2,70 cm. Para o Comercial Maranello resulta flecha 1,91 cm, enquanto que o limite é 2,70 cm.

Seguem os projetos de fôrmas e armaduras.

Comercial Rubi
Comercial Rubi - Laje maciça com vigas - Fôrmas

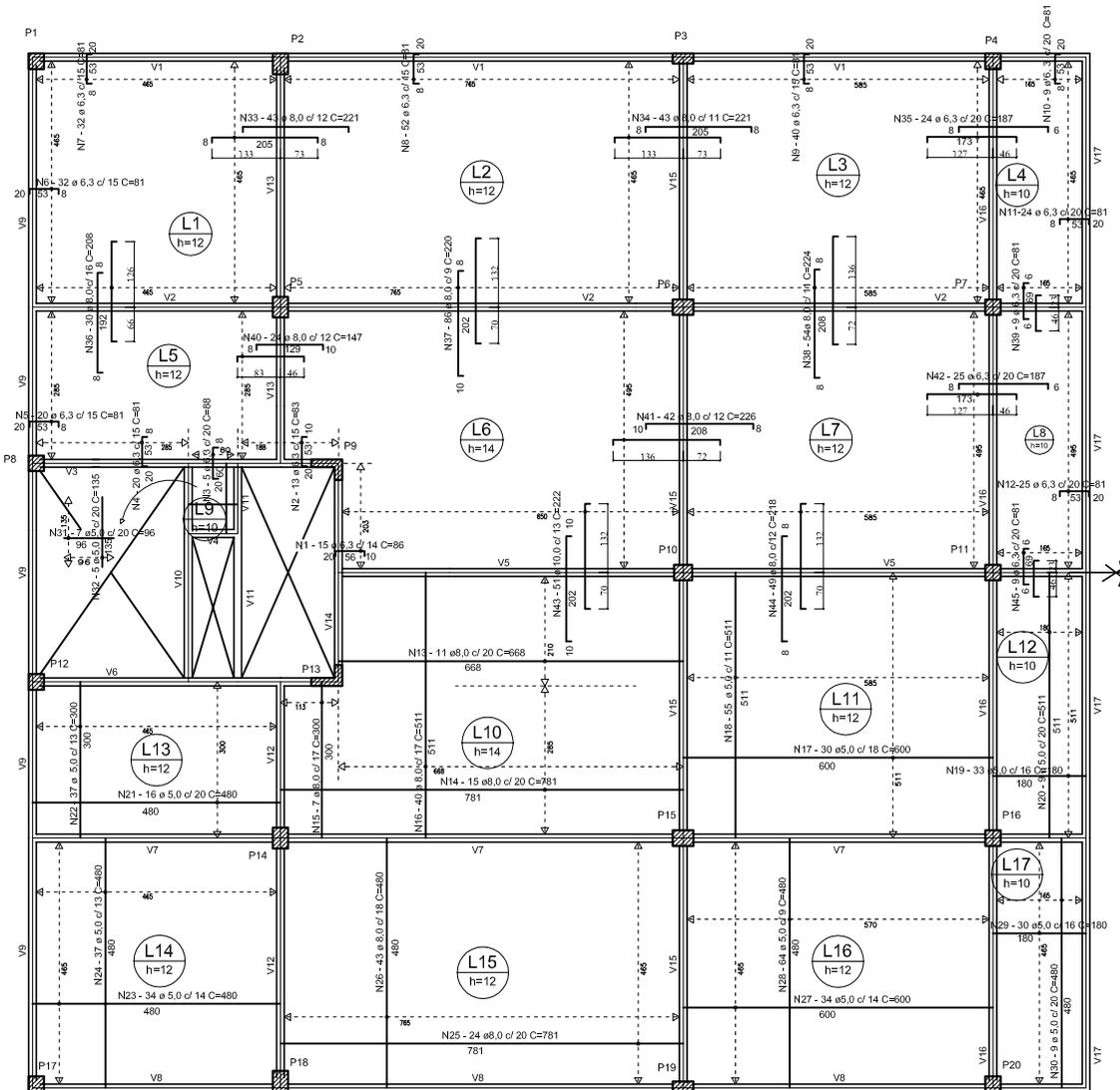
Prancha 1/3
Sem escala.



Comercial Rubi

Laje maciça com vigas - ARMADURAS

Prancha 2/3
Sem escala.



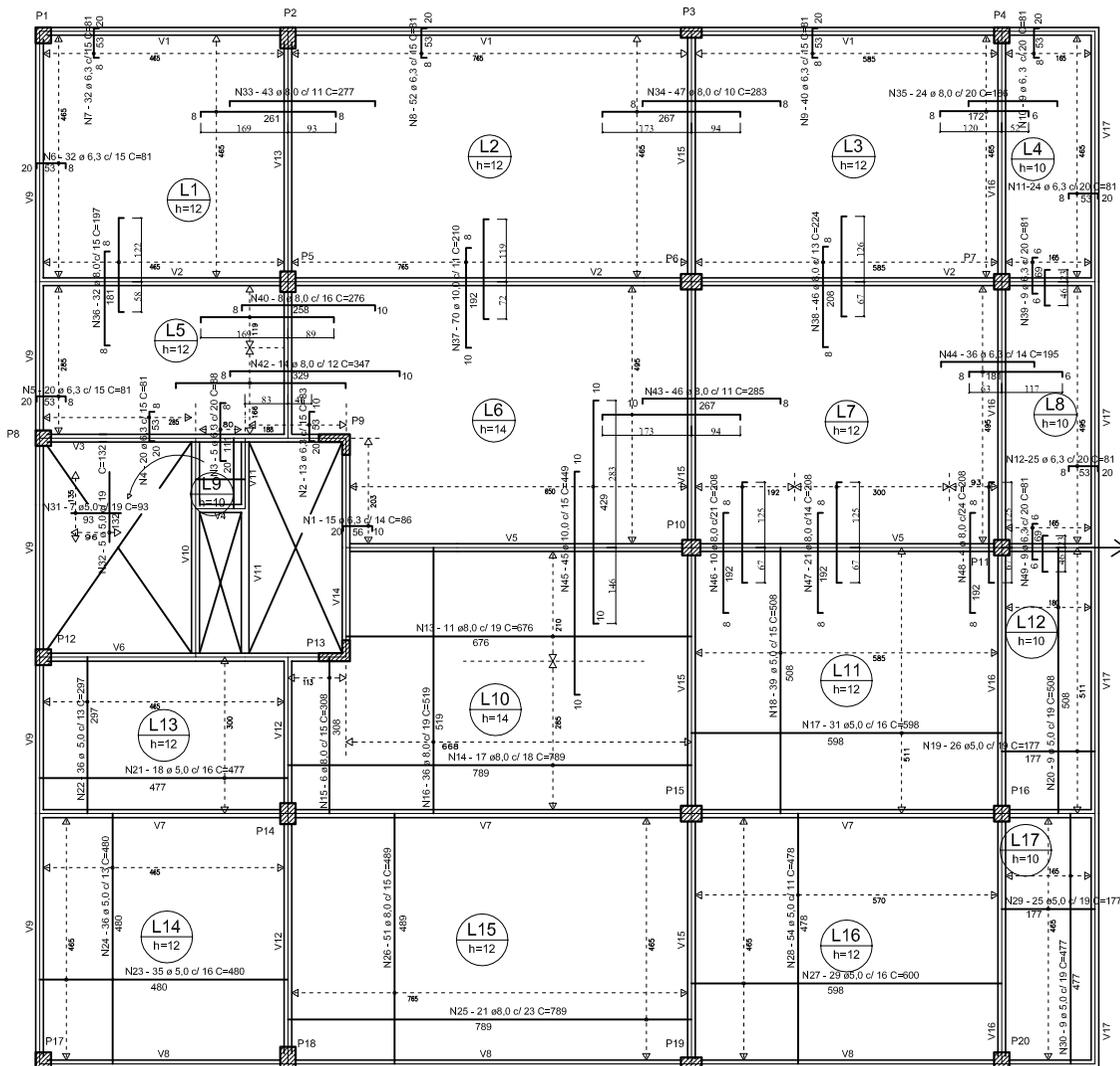
OBS: Possuem espessura menor as lajes L4, L8, L9, L12 e L17: h=10 cm.

OBS: As lajes L06 e L10 possuem espessura 14 cm. As outras lajes possuem espessura 12 cm.

OBS: Armaduras dispostas de modo simétrico.
Resultados pelo uso das tabelas de Bares

Comercial Rubi
Laje maciça com vigas - ARMADURAS

Prancha 3/3
Sem escala.



OBS: Possuem espessura menor as lajes L4, L8, L9, L12 e L17: h=10 cm.

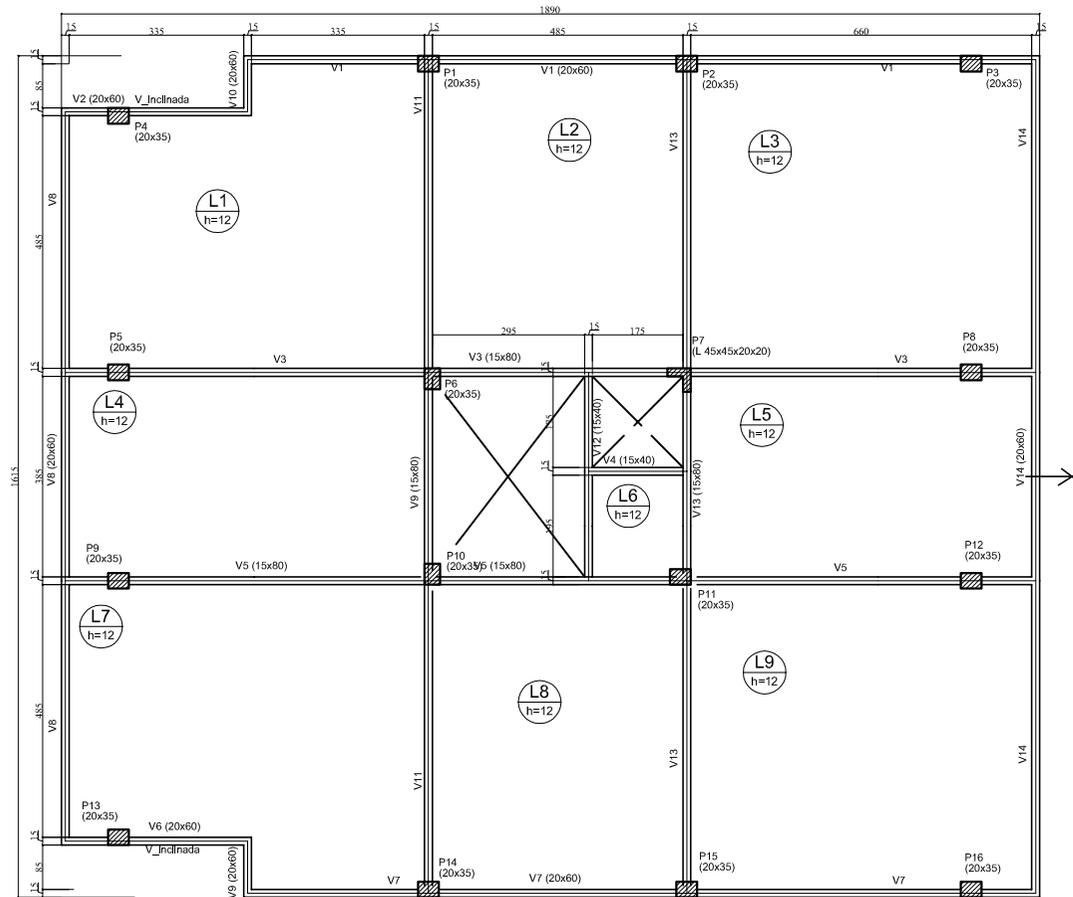
OBS: As lajes L06 e L10 possuem espessura 14 cm. As outras lajes possuem espessura 12 cm.

OBS: Armaduras dispostas de modo simétrico.

Resultados pelo uso das Analogia de Grelhas - Eberick V7 Gold

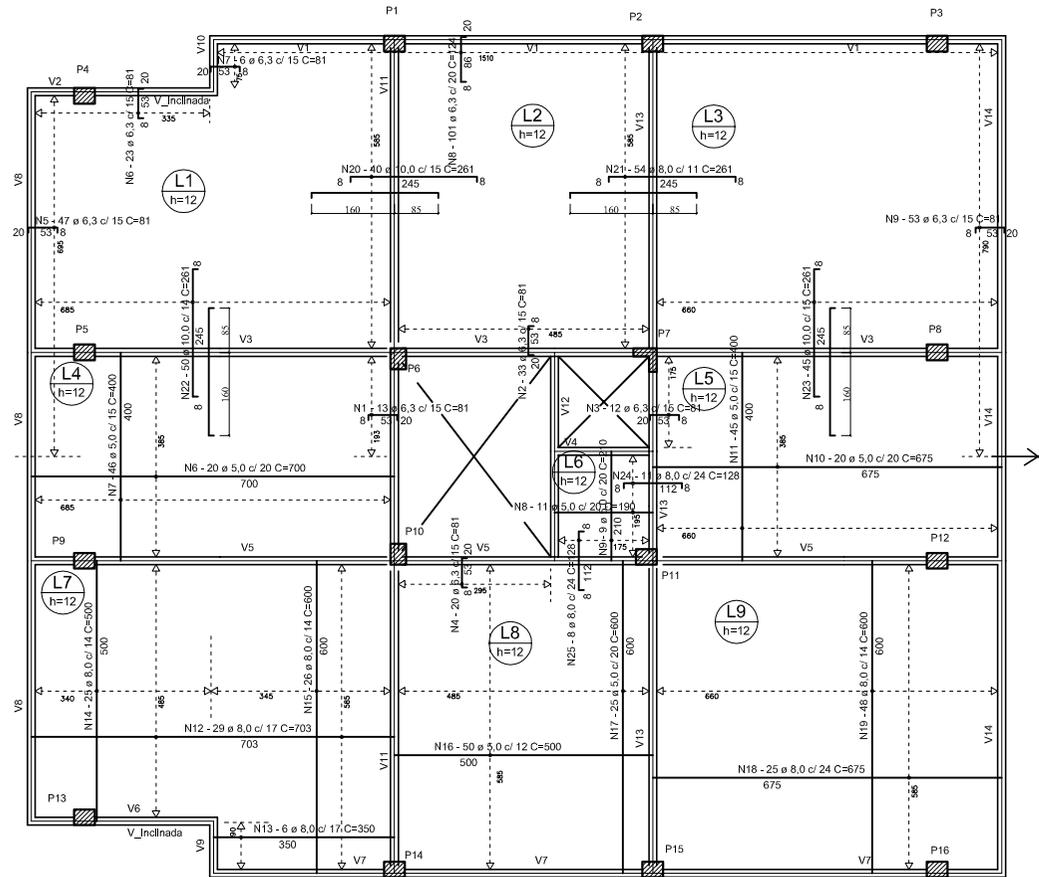
Comercial Maranello
Laje maciça com vigas: Fôrmas

Prancha 1/3
Sem escala.



Comercial Maranello
Laje maciça com vigas: Armaduras

Prancha 2/3
Sem escala.

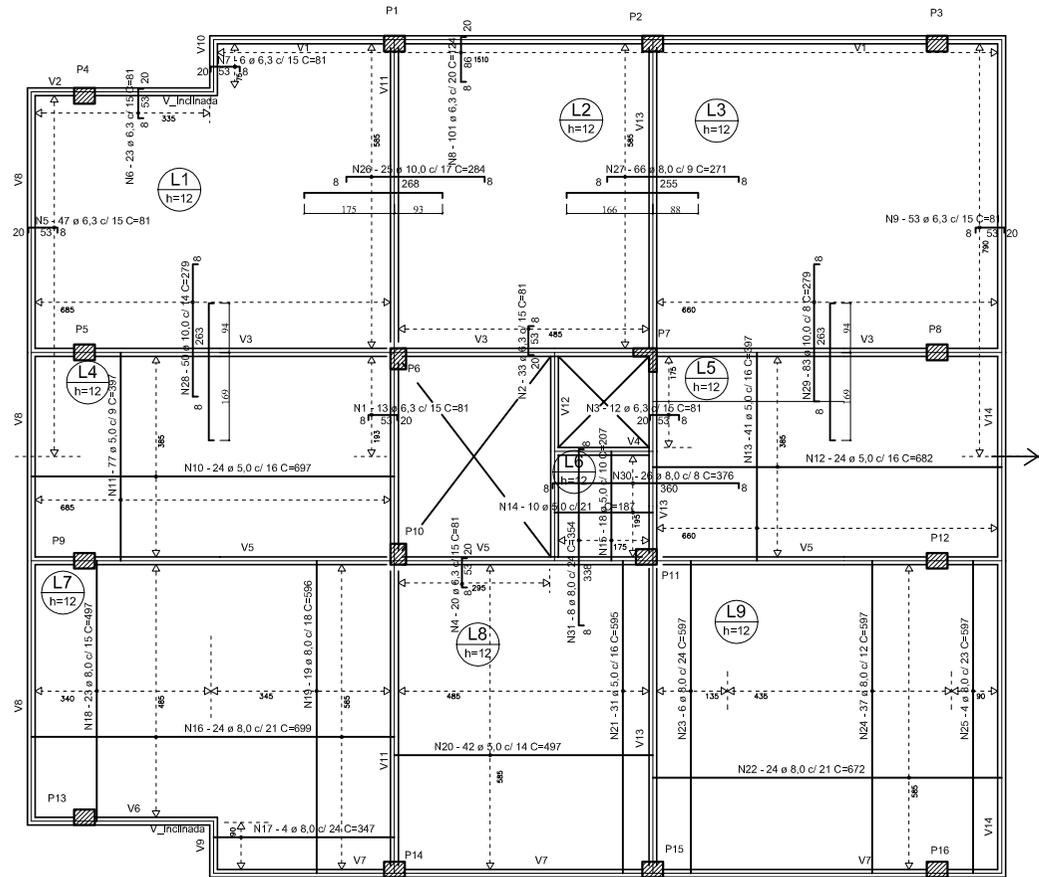


Resultados pelo uso das tabelas de Bares

OBS: Armaduras dispostas de modo simétrico.

Comercial Maranello
Laje maciça com vigas: armaduras

Prancha 3/3
Sem escala.



Resultados pelo uso da Analogia de Grelhas / Eberick V7Gold

OBS: Armaduras dispostas de modo simétrico.

8 DIRETRIZES PARA CONCEPÇÃO E ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE ESTRUTURAS COM PAVIMENTOS SEM VIGAS

a) Considerações sobre as lajes

Ching *et al* (2010) explicam que a direção das lajes é determinada principalmente pela sua posição no pavimento e pela direção das vigas, e que isto influencia o tipo de composição espacial e até mesmo o custo da edificação.

Pode ser feito uso de estimativas iniciais como pré-dimensionamento de pavimentos, para então reduzir ou aumentar a espessura das lajes, conforme os indicativos de deformações excessivas ou de excesso de armadura (seção superdimensionada).

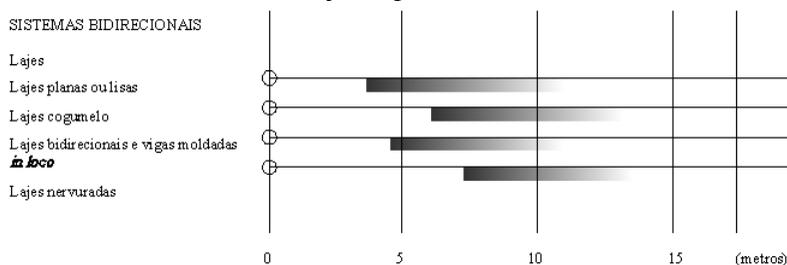


Figura 15 – Ordem de grandeza de sistemas bidirecionais. Adaptação (Sistemas Estruturais Ilustrados, 2010)

A Figura 15 destaca a possibilidade de relacionar a eficiência das alternativas sem vigas entre si por intermédio de uso de ábacos. Além de definir uma alternativa inicial, também permite estimar qual a correspondente espessura.

Faria (2004) expõe outra opção para estimativa inicial da espessura da laje em função do vão, por meio de uso do ábaco abaixo:

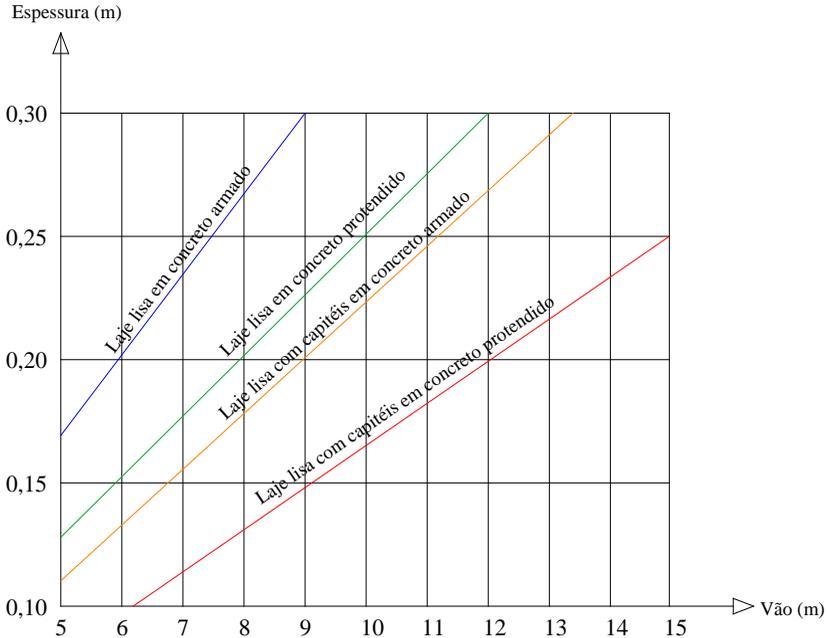


Figura 16 - Ábaco de ordem de grandeza: espessura em função do vão (Adapt. Faria, 2004)

b) Considerações sobre a arquitetura

Quando idealizada uma arquitetura que faz uso da alternativa em laje lisa, é boa prática posicionar as prumadas de banheiros com espaçamentos que os façam interferir na arquitetura o mínimo possível, obedecendo a certa modulação que concorde com aquela da arquitetura.

Então a modulação dos banheiros segue uma malha que os afasta conforme a distância esperada entre pilares, para ocultá-los. Os cantos do patamar da escada também podem ser usados para tal finalidade.

c) Considerações sobre efeitos globais

Referente à estabilidade global, Ching *et al* (2010) expõem que, em geral, os diafragmas estruturais têm muita resistência e rigidez em seus planos, permitindo a amarração dos pilares e paredes de cada

pavimento e o fornecimento de resistência lateral para os elementos estruturais que necessitam de travamento. Citam ainda que planos de piso rígidos podem também ser projetados para atuar como diafragmas horizontais que funcionam como vigas finas e altas, transferindo esforços laterais para pilares e paredes, que atuam também ao cisalhamento.

Entretanto, Araújo (2010, v. 2) cita que a ausência de vigas faz com que a estrutura seja muito deformável frente às ações horizontais, gerando inconvenientes para estruturas de edifícios altos e que devem ser projetados elementos de contraventamento para reduzir estes efeitos laterais.

Ching *et al* (2010) esclarecem que a continuidade é sempre uma condição estrutural desejável, então recomenda-se que os elementos estruturais sejam estendidos conforme as principais linhas de apoio, de maneira a criar uma grelha tridimensional, buscando seguir alguma modulação.

Ellwanger (2002) cita que a rigidez da estrutura de uma edificação varia inversamente com a relação altura / largura. Os projetos deste trabalho possuem 4 pavimentos, então se considera que os efeitos de segunda ordem possam ser desprezados.

Dependendo do grau de rigidez da estrutura, podem-se usar somente pilares como elementos portantes ou fazer uso de paredes resistentes para aumentar a rigidez lateral. A estrutura de um pavimento também atua como um diafragma em relação às forças laterais.

Ellwanger (2002) explica que, apesar de possuir relativa flexibilidade, as lajes planas acrescentam rigidez ao sistema estrutural, porque determinadas faixas de lajes funcionam como vigas baixas e largas que, atuando em conjunto com os pilares (devido ao caráter monolítico da estrutura de concreto armado), definem um comportamento de pórtico ao sistema.

d) Considerações sobre a execução e instalações

Uma variável que impacta no custo, mas em menor efeito, é que, quanto menor o número de peças a ser montadas, menor o tempo de execução. Desta maneira, uma laje é executada mais rapidamente quando são empregadas cubetas de maiores dimensões do que cubetas de menores dimensões. Para fins de simplicidade, este efeito é desconsiderado, pois pouco interfere no tempo de mão-de-obra.

Uma importante diretriz é a adequação da estrutura para integrar os sistemas mecânicos e as instalações aos elementos estruturais.

Ellwanger (2002) explica que os sistemas mecânicos, elétricos, de água e esgoto representam em média pouco mais de 33% do custo total de um edifício. Considera-se para este estudo que a escolha de uma das alternativas de pavimento dentre as demais causa pequena variação neste custo.

e) Considerações sobre pilares

Damasceno & Oliveira (2007) observam que, aumentando as relações entre os lados dos pilares, pode-se conduzir o comportamento global das lajes (se unidirecionais) quando submetidas à solicitações excessivas a atuar de maneira a substituir a ruptura frágil por uma ruptura dúctil (por flexão). É desejável que, ao ocorrer solicitação excessiva, a ruína ocorra por flexão e não por punção, uma vez que estas últimas são rupturas frágeis. Então, alterações na concepção estrutural podem melhorar a confiabilidade da estrutura.

Outra importante observação de Damasceno & Oliveira (2007) é que um pequeno aumento na taxa de armadura secundária das lajes melhora o desempenho à punção. Os autores concluem ainda que, para baixas taxas de armadura de flexão secundária, a resistência ao puncionamento é antecipada e parte da resistência à flexão não chega a ser mobilizada.

9 LEVANTAMENTO DE QUANTITATIVOS

Ao longo do desenvolvimento dos projetos, toma-se o cuidado de manter os critérios de dimensionamento entre um e outro projeto, para preservar a igualdade de condições. Os quantitativos são levantados por pavimento. Dado o interesse exclusivo nos quantitativos que se referem a lajes e vigas, não se fazem quaisquer considerações sobre pilares e fundações nos quadros de quantitativos.

A importância desta etapa evidencia-se pela necessidade da obtenção de índices coerentes para cada situação, para então tornar representativa a comparação que define quais alternativas destacam-se dentre as demais.

Se os quantitativos propostos nesta etapa não corresponderem com adequada precisão ao projeto proposto, os índices de consumo (obtidos através do tratamento dos resultados quantitativos) podem estar equivocados ou imprecisos.

Os resultados são expostos mais adiante, junto com os índices.

10 ÍNDICES DE CONSUMO PARA A ANÁLISE QUANTITATIVA

Existem diversas publicações relacionadas aos consumos de materiais, como por exemplo, Figueiredo (1989), Duarte (1998), Albuquerque (1999), Silva (2002) e Spohr (2008), desta maneira, é comum surgir tendências para determinadas alternativas que se disseminam pelo meio técnico, causadas por análises equivocadas, superficiais ou sem adequada precisão.

Cada edificação tem suas características próprias, e este estudo fornece índices que são exatos para cada um dos projetos deste trabalho.

Aos profissionais que elaboram cálculo estrutural, aos orçamentistas e incorporadores, é desejável possuir dados para permitir pré-análises de viabilidade.

Alguns projetistas realizam a análise comparativa por pré-dimensionamento. Tal estudo é impreciso porque deixa de considerar os quantitativos exatos de armaduras que surgem depois do dimensionamento e detalhamento das armaduras. Neste caso, elimina-se a possibilidade de aprimoramento na redução de custos que o processo de desenvolvimento do projeto estrutural pode fornecer. Além disto, a própria arquitetura tem influência na definição do modelo estrutural, uma alteração neste ocasiona a mudança dos valores dos esforços e conseqüentemente, o consumo de materiais.

Outro inconveniente das análises por pré-dimensionamento são os impactos que determinados projetos arquitetônicos (especificidades) impõem na concepção de determinado modelo estrutural, porque certas disposições podem onerar demasiadamente alguma solução de pavimento para projeto, podendo até mesmo torná-la inviável, quando não restringir sua aplicabilidade.

Este estudo fornece índices aplicáveis para a fase de anteprojeto, visto que os índices de consumo aqui abordados conduzem a resultados que são cada vez mais precisos conforme a edificação proposta mais se assemelha àquela que originou os índices de consumo. Os índices (ou parâmetros) de consumo têm sua aplicabilidade na análise quantitativa porque fornecem estimativas preliminares do que é obtido em termos de consumo para o cálculo aproximado de custos estruturais.

Comumente verifica-se que diversos profissionais apreciam índices de consumo que se correlacionam com parâmetros de instabilidade, ou número de repetições dos pavimentos. A correlação se justifica porque, quanto mais alta a edificação, maiores os efeitos no consumo de materiais para estabilizar a estrutura. Porém, vale ressaltar

que é um tanto arriscado confiar unicamente nestes índices, uma vez que estes variam conforme as características da edificação que origina os índices se distanciam daquelas da edificação proposta.

Por este motivo, este trabalho tem sua aplicabilidade para fins de concepção estrutural, pré-análise de viabilidade e para descartar determinada solução para estrutura de pavimento, caso a situação não se enquadre nos índices de consumo e ao mesmo tempo nos qualitativos propostos ao longo do trabalho.

Pode-se afirmar que os índices obtidos para cada estudo podem servir como uma estimativa inicial de consumo de materiais naqueles projetos que tenham arquitetura similar. Outra aplicação é servir de indicativo no levantamento de quantitativos, pois resultados em arquiteturas semelhantes muito distintos daqueles obtidos, podem acusar erros de levantamento de quantitativos, ou de subdimensionamento ou superdimensionamento de estruturas.

Comumente, em escritórios de engenharia, projetistas usam índices bem genéricos, cuja aplicabilidade se dá a estruturas convencionais, onde o volume de concreto é cerca de $0,22 \text{ m}^3/\text{m}^2$ de laje; o peso de aço estrutural varia entre 80 a 100 kg para cada m^3 de concreto; e a área de fôrmas é algo entre 10 e 14 m^2 para cada m^3 de concreto. O emprego de outros índices também muito aproximados para estes tipos de estruturas é válido, como por exemplo, arbitrar que o custo total da estrutura varia de 22 a 25% daquele da edificação ou que o custo das fundações é algo entre 2 a 5% daquele da edificação.

Objetiva-se com estes índices, identificar os efeitos da arquitetura e da disposição das lajes, correlacionando-os.

É evidente que, para obter o custo estrutural de uma edificação, o modelo estrutural deve ser processado e realizado seu dimensionamento em diversas alternativas de pavimentos, para então efetuar o detalhamento e, finalmente, orçar os quantitativos que originam os índices para aquela edificação.

10.1 DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES

O cálculo dos índices envolve a consideração dos valores das áreas estruturais de cada pavimento, sendo que a área estrutural de um pavimento do Comercial Rubi é $388,07 \text{ m}^2$ e a do Comercial Maranello é $285,95 \text{ m}^2$. Esta área estrutural não considera os vazios de escada e de elevador.

Definem-se os seguintes índices:

a) consumo de fôrmas por área do pavimento: Ferreira (2005) cita que, para lajes nervuradas, o custo das fôrmas pouco se altera conforme a variação da altura da cubeta. O levantamento de quantitativos de área de fôrmas considera também a área de escoramentos.

Cabe a observação que, para ambos os projetos de laje lisa nervurada (com cubetas), o assoalho da laje é simplificado para guias e escoras, que tem grande índice de aproveitamento, então a quantidade encontrada para as lajes pode ser desprezada quando confrontada com aquela das vigas.

Este índice relaciona a superfície das fôrmas com a área estrutural do pavimento dos projetos.

b) consumo de concreto por área de pavimento: este índice relaciona o volume de concreto com a área estrutural.

c) peso de aço por área de pavimento: este índice relaciona o consumo de aço gasto por área estrutural.

d) carga total nas fundações: este índice cita a carga total atuante nas solicitações. Como a área estrutural para cada uma das alternativas é fixa conforme o projeto, pode-se ter uma noção mais apurada do consumo de concreto.

e) variação dos consumos em relação ao projeto do Comercial Rubi: define-se este projeto como sendo referência, então os consumos do Comercial Maranello são relacionados aos do Comercial Rubi, buscando verificar os coeficientes e avaliar possíveis impactos da arquitetura nos índices.

11 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados são analisados qualitativamente e quantitativamente, buscando esclarecer qual alternativa mostra-se menos onerosa para determinado projeto.

11.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Estudar a viabilidade é muito mais que apenas definir qual alternativa pode ser executada da maneira menos onerosa, mas definir como o processo de execução, a tipologia da mão-de-obra, a capacidade (disponibilidade) de fornecimento e possibilidade de transporte (tanto horizontal quanto vertical) de materiais, os equipamentos disponíveis e o tempo de execução interferem na escolha da alternativa de pavimento.

Esta análise visa julgar quão efetiva é a adoção de determinada alternativa para o pavimento, visto que, conforme as especificidades do projeto podem ocorrer interferências na modulação das cubetas, na disposição das vigas, ou até mesmo vir a inviabilizar determinado projeto. Este trabalho identifica algumas situações onde a alternativa para o pavimento, de tão inadequada para certa ocasião, se torna inviável de antemão.

A análise do levantamento de quantitativos fornece informações para possibilitar o estudo da viabilidade.

Nem sempre aquele projeto de menor custo estrutural é o mais viável, visto que objetiva-se o retorno financeiro e este se dá conforme o preço que pode ser praticado por determinada unidade autônoma. Algumas vezes surge a necessidade de ocultar a estrutura (como em edificações de alto padrão), ou até mesmo para valorizar alguns detalhes arquitetônicos.

Para decisões do tipo de laje a adotar para determinado pavimento, não faz sentido afirmar que determinada solução é mais viável em detrimento das demais, pois determinadas disposições arquitetônicas podem exigir o uso de alguma ou outra tecnologia de laje ou até mesmo descartar o uso de determinada alternativa para pavimento.

Muitas vezes, uma alternativa estrutural para pavimento se mostra mais econômica que outra na proporção que determinadas especificidades de projeto se sobressaem, por este motivo, analisar o custo técnico e financeiro de uma laje, de maneira isolada das condições arquitetônicas pode conduzir a erros. É necessário analisar todas as

condições de contorno e o planejamento estratégico das atividades para posteriormente definir para determinado caso, qual alternativa é mais econômica.

11.2 COMBINAÇÕES DAS ALTERNATIVAS

Existem determinadas semelhanças que ocorrem com grande frequência entre as edificações usuais, como por exemplo, os andares de garagens seguidos dos pavimentos tipo. É possível fazer uso desta característica para a obtenção de vantagens em redução de custos, se escolhida determinada solução estrutural para o pavimento que suporta as garagens e outra solução estrutural para os pavimentos tipo e de reservatório. Tal decisão justifica-se pelo fato que os sistemas de lajes lisas nervuradas ganham viabilidade quando as cubetas são alugadas, então convém seu emprego em ambientes racionalizados.

Um estudo específico pode evidenciar os benefícios de combinar diferentes alternativas de pavimentos, visto que se pode tirar proveito de características específicas de determinada alternativa para pavimento para cada um dos diferentes fins que a edificação se destina.

Uma possível combinação é usar laje lisa nervurada para o andar da garagem e também no pavimento seguinte, pois nestes casos não existe a necessidade de ocultar as nervuras por intermédio da execução de forro.

11.3 ANÁLISE DE ADEQUABILIDADE ARQUITETÔNICA

Cada alternativa para pavimento possui vantagens e desvantagens quando comparadas entre si. Nesta etapa, objetiva-se quantificar se a vantagem demonstrada anteriormente é efetiva, uma vez que podem surgir custos para executar atividades de acabamento, por exemplo, quando definida determinada alternativa estrutural.

Para a alternativa de laje lisa nervurada, considera-se que sejam importantes os efeitos da modulação das cubetas, visto que nem sempre a opção de meia cubeta resolve satisfatoriamente a complementação da laje. Eventuais compensações são necessárias e então os alargamentos de bases de vigas e aumento de regiões de engrossamento junto aos apoios.

Lançar os pilares tornando semelhantes os vãos das lajes é um possível meio de minimizar o custo do pavimento, porque existe a

possibilidade de evitar regiões com armadura mínima, melhorando o consumo de aço e reduzindo o volume de concreto por consequência da adoção de menor espessura. Neste trabalho, admitem-se pequenas variações na posição e na seção dos pilares, entre as alternativas, mas sempre mantendo a mesma quantidade de pilares.

Algumas formas de arquiteturas com interrupções e recortes necessitam de pilares próximos, tal decisão de projeto frustra a precisão dos índices de consumo.

11.4 ANÁLISE DE QUANTITATIVOS

Ressaltadas as características da análise qualitativa e definidos os índices, seguem os resultados, relacionados conforme alternativa.

Para melhor discernimento da origem de cada índice, separam-se os quadros em lajes e vigas, e em seguida realiza-se a unificação destes, por pavimento.

I) Área de fôrmas

O Quadro 1, o Quadro 2 e o Quadro 3 relacionam as alternativas de cada edificação com o índice de consumo e sua respectiva quantidade.

As análises tratam os dados pela superfície de fôrmas, independentemente quanto à facilidade construtiva. Apesar disto, ressalta-se que existem variações quanto ao desempenho da mão-de-obra, pois, segundo Figueiredo (1989), a produtividade por m² de fôrmas para lajes é cerca de 1,54 vezes maior que aquela para vigas.

Quanto à facilidade construtiva, cabe esclarecer que as lajes nervuradas apresentam área de fôrmas em quantidade que pode ser desprezada quando comparada com as outras alternativas, pois abrange apenas as regiões maciças para adaptar a modulação, quando deve-se considerar haver um custo adicional em escoramento específico para este sistema e cubetas. Esta questão é tratada qualitativamente.

Quadro 1 - Quantidades de fôrmas (lajes)

Área de fôrmas (lajes)	Comercial Rubi A = 388,07 m ²		Comercial Maranello A = 285,95 m ²	
	Área de fôrmas (m ²)	Área de fôrmas / Área estrut. (m ² /m ²)	Área de fôrmas (m ²)	Área de fôrmas / Área estrut. (m ² /m ²)
Alt. 1: Laje lisa maciça h=16	372,95	0,96	262,95	0,92
Alt. 2: Laje lisa maciça h=23	372,95	0,96	262,95	0,92
Alt. 3: Laje lisa nervurada	1,43	0,004	3,32	0,012
Alt. 4: Convencional	355,95	0,92	261,16	0,91

* OBS: não considera a área e nem a quantidade de cubetas.

Quadro 2 - Quantidades de fôrmas (vigas)

Área de fôrmas (vigas)	Comercial Rubi A = 388,07 m ²		Comercial Maranello A = 285,95 m ²	
	Área de fôrmas (m ²)	Área de fôrmas / Área estrut. (m ² /m ²)	Área de fôrmas (m ²)	Área de fôrmas / Área estrut. (m ² /m ²)
Alt. 1: Laje lisa maciça h=16	131,80	0,34	119,50	0,42
Alt. 2: Laje lisa maciça h=23	124,70	0,32	112,90	0,39
Alt. 3: Laje lisa nervurada	135,54	0,35	152,11	0,53
Alt. 4: Convencional	332,37	0,86	240,47	0,84

Quadro 3 - Quantidades de fôrmas (pavimento)

Área de fôrmas (pavimento)	Comercial Rubi A = 388,07 m ²		Comercial Maranello A = 285,95 m ²	
	Área de fôrmas (m ²)	Área de fôrmas / Área estrut. (m ² /m ²)	Área de fôrmas (m ²)	Área de fôrmas / Área estrut. (m ² /m ²)
Alt. 1: Laje lisa maciça h=16	504,75	1,30	382,45	1,34
Alt. 2: Laje lisa maciça h=23	497,65	1,28	375,85	1,31
Alt. 3: Laje lisa nervurada *	136,97	0,35	155,43	0,54
Alt. 4: Convencional	688,32	1,77	501,63	1,75

* OBS: não considera a área e nem a quantidade de cubetas.

II) Volume de concreto

Pode-se notar que as quantidades e os índices encontrados são tratados sem distinção quanto ao fato que a execução de 1 m³ de concreto para lajes sem vigas, pela característica de simplicidade executiva, é menos oneroso que a execução desta mesma quantidade de concreto para lajes com vigas.

Quadro 4 - Volume de concreto (lajes)

Volume de concreto (lajes)	Comercial Rubi A = 388,07 m ²		Comercial Maranello A = 285,95 m ²	
	Volume de concreto (m ³)	Volume de concreto / Área estrut. (m ³ /m ²)	Volume de concreto (m ³)	Volume de concreto / Área estrut. (m ³ /m ²)
Alt. 1: Laje lisa maciça h=16	59,61	0,15	42,07	0,15
Alt. 2: Laje lisa maciça h=23	85,65	0,22	60,48	0,21
Alt. 3: Laje lisa nervurada	70,11	0,18	63,90	0,22
Alt. 4: Convencional	43,50	0,11	31,34	0,11

Quadro 5 - Volume de concreto (vigas)

Volume de concreto (vigas)	Comercial Rubi A = 388,07 m ²		Comercial Maranello A = 285,95 m ²	
	Volume de concreto (m ³)	Volume de concreto / Área estrut. (m ³ /m ²)	Volume de concreto (m ³)	Volume de concreto / Área estrut. (m ³ /m ²)
Alt. 1: Laje lisa maciça h=16	5,99	0,02	12,31	0,04
Alt. 2: Laje lisa maciça h=23	9,71	0,03	12,74	0,04
Alt. 3: Laje lisa nervurada	8,95	0,02	13,53	0,05
Alt. 4: Convencional	24,59	0,06	18,47	0,06

Quadro 6 - Volume de concreto (pavimento)

Volume de concreto (pavimento)	Comercial Rubi A = 388,07 m ²		Comercial Maranello A = 285,95 m ²	
	Volume de concreto (m ³)	Volume de concreto / Área estrut. (m ³ /m ²)	Volume de concreto (m ³)	Volume de concreto / Área estrut. (m ³ /m ²)
Alt. 1: Laje lisa maciça h=16	65,60	0,17	54,38	0,19
Alt. 2: Laje lisa maciça h=23	95,36	0,25	73,22	0,26
Alt. 3: Laje lisa nervurada	79,06	0,20	77,43	0,27
Alt. 4: Convencional	68,09	0,18	49,81	0,17

II) Consumo de aço

Embora seja realizada a análise sem esta distinção, Figueiredo apud Hanai (1989) explica que a mão-de-obra necessária para a execução de armaduras em lajes maciças sem vigas é 40% menor que aquele para os sistemas convencionais.

Quadro 7 - Consumo de aço (lajes)

Consumo de aço (lajes)	Comercial Rubi A = 388,07 m ²		Comercial Maranello A = 285,95 m ²	
	Consumo de aço (kg)	Consumo de aço / Área estrut. (kg/m ²)	Consumo de aço (kg)	Consumo de aço / Área estrut. (kg/m ²)
Alt. 1: Laje lisa maciça h=16	7256,79	18,70	7280,81	25,46
Alt. 2: Laje lisa maciça h=23	5820,03	15,00	5190,40	18,15
Alt. 3: Laje lisa nervurada	5857,43	15,09	2971,90	10,39
Alt. 4: Convencional	2181,28	5,62	1954,65	6,84

Quadro 8 - Consumo de aço (vigas)

Consumo de aço (vigas)	Comercial Rubi A = 388,07 m ²		Comercial Maranello A = 285,95 m ²	
	Consumo de aço (kg)	Consumo de aço / Área estrut. (kg/m ²)	Consumo de aço (kg)	Consumo de aço / Área estrut. (kg/m ²)
Alt. 1: Laje lisa maciça h=16	603,80	1,56	1196,70	4,18
Alt. 2: Laje lisa maciça h=23	982,00	2,53	1106,70	3,87
Alt. 3: Laje lisa nervurada	884,70	2,28	1244,30	4,35
Alt. 4: Convencional	2432,90	6,27	1527,75	5,34

O Quadro 7, o Quadro 8 e o Quadro 9 mostram que na alternativa convencional, a quantidade de armadura para lajes e vigas é praticamente da mesma ordem de grandeza, isto ocorre nos dois projetos.

Quadro 9 - Consumo de aço (pavimento)

Consumo de aço (pavimento)	Comercial Rubi A = 388,07 m ²		Comercial Maranello A = 285,95 m ²	
	Consumo de aço (kg)	Consumo de aço / Área estrut. (kg/m ²)	Consumo de aço (kg)	Consumo de aço / Área estrut. (kg/m ²)
Alt. 1: Laje lisa maciça h=16	7860,59	20,26	8477,51	29,65
Alt. 2: Laje lisa maciça h=23	6802,03	17,53	6297,10	22,02
Alt. 3: Laje lisa nervurada	6742,13	17,37	4216,20	14,74
Alt. 4: Convencional	4614,18	11,89	3482,40	12,18

Vale destacar que os vãos entre pilares do Comercial Maranello são da ordem de 6 metros, enquanto que os do Comercial Rubi são aproximadamente desta ordem de grandeza mas um pouco maiores e desuniformes (variando de 3 até 7,80 metros), e que ainda ambos os projetos trazem quadros bidirecionais.

a) Laje lisa maciça h = 16 X Laje lisa maciça h = 23

Os índices obtidos mostram que, para o elemento estrutural laje, na alternativa de laje lisa maciça com espessura 16 cm, do Comercial Maranello, o menor consumo de concreto (destacado no Quadro 4) é contrabalanceado pelo aumento do consumo de aço (evidenciado no Quadro 9). Mostram ainda que, o aumento do volume de concreto (ocorrido quando a espessura cresce de 16 para 23 cm), reflete-se num menor consumo de aço.

Entretanto nota-se que, para uma pequena redução no consumo de aço, torna-se necessário elevar o volume de concreto (aumentando-se a espessura da laje), para cada um dos projetos, em 43,75%.

Difícilmente haverá condições em que seja preferível adotar a espessura 23 cm ao invés de 16 cm.

b) Laje lisa maciça h = 16 X Laje convencional

Tanto para o Comercial Maranello, quanto para o Comercial Rubi, analisando os índices obtidos para as quantidades do pavimento, e confrontando as alternativas convencional e de laje lisa maciça, para um volume de concreto de mesma ordem de grandeza, pode-se afirmar que os consumos de aço quase dobram, conforme mostram o Quadro 6 e o Quadro 9.

Os índices de consumo do elemento estrutural laje mostram ainda que, quando se confronta a alternativa convencional com ambas as alternativas de laje lisa maciça (ambas as espessuras), verifica-se haver menor consumo de aço e menor volume de concreto gasto na alternativa de laje convencional. A maior diferença, tanto para concreto quanto para aço é encontrada no Comercial Maranello. Vale ainda ressaltar que o volume de concreto da laje é muito maior que aquele das vigas, então as lajes influenciam o volume de concreto do pavimento muito mais que as vigas.

Para este caso, se considerados apenas aspectos de consumo de material e se garantido o reaproveitamento das fôrmas, pode-se afirmar que a alternativa convencional é mais viável que a opção de lajes lisas maciças, tanto na espessura 16 cm, quanto na espessura 23 cm, para ambos os pavimentos.

Um estudo anterior realizado por Marcellino & Dal Prá (2010) esclarece que este efeito acentua-se para pequenos vãos bidirecionais (da ordem de 4 a 5 metros), enquanto que, para vãos de 6 e 7 metros, o volume de concreto e o consumo de armadura da alternativa convencional começam a se elevar de maneira significativa. Isto significa que, se aumentada a quantidade de pilares, reduzindo a distância entre os quadros da laje, a alternativa de laje convencional ganha ainda mais vantagem.

Seguem dois gráficos (Figura 17 e Figura 18) do estudo anterior, que ilustram este efeito.

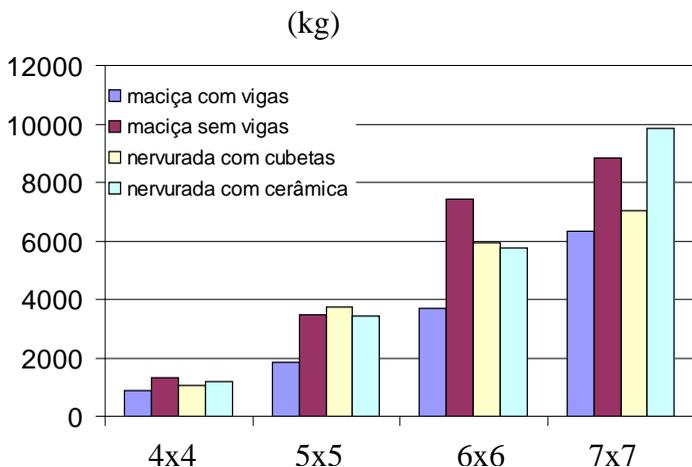


Figura 17 - Comparativo de consumo de aço (kg) (Marcellino & Dal Prá, 2010)

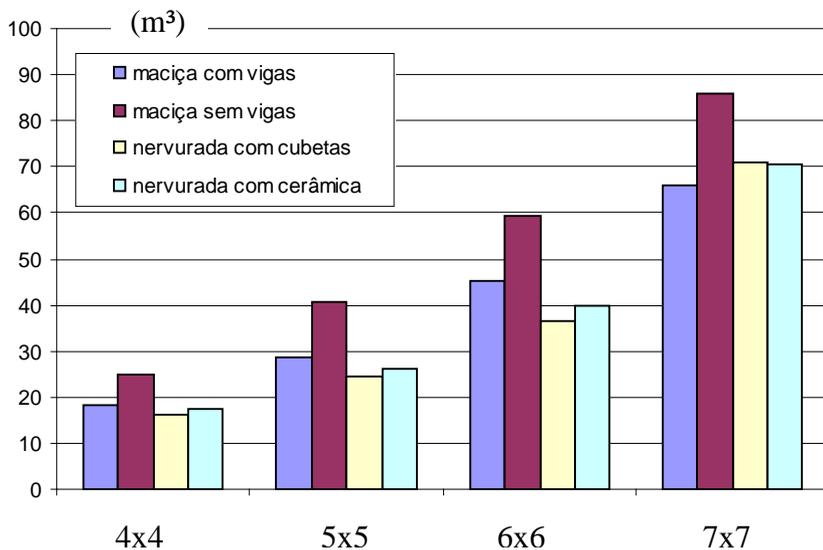


Figura 18 - Comparativo de volume de concreto (m³) (Marcellino & Dal Prá, 2010)

c) Laje lisa maciça X outras alternativas

Para ambos os casos de laje lisa maciça, o volume de concreto se mostra mais elevado que aquele das outras alternativas, e o consumo de aço cresce de maneira considerável quando usada uma espessura de laje reduzida. Qualitativamente, cabe ressaltar que, num local onde as fôrmas tem custo significativo (seja por valor do material ou da mão-de-obra), este tipo de opção construtiva perde ainda mais vantagem frente à opção de laje lisa nervurada, e que, conforme mostra o estudo anterior realizado por Marcellino & Dal Prá (2010), este efeito se potencializa de acordo com o aumento do vão. Segue o gráfico (Figura 19) que ilustra este efeito:

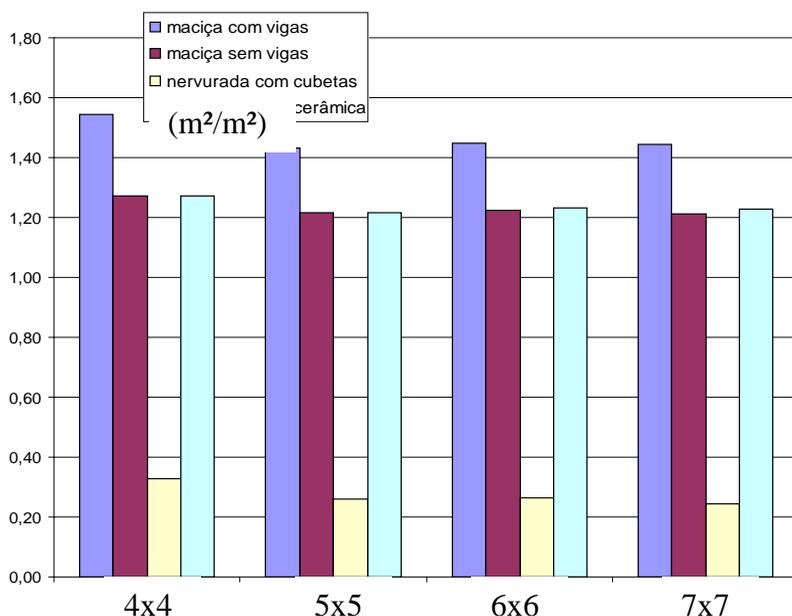


Figura 19 – Consumo de fôrmas por área de pavimento. (m²/m²) (Marcellino & Dal Prá, 2010)

d) Laje lisa maciça X Laje lisa nervurada

Verifica-se que, para ambos os projetos, existe viabilidade da alternativa de laje lisa nervurada sobre a alternativa de laje maciça sem vigas (para ambas espessuras) quando estuda-se apenas os efeitos de consumo de materiais e a finalidade a que se destina dispensa a necessidade de ocultar as nervuras.

Geralmente as construtoras alugam as cubetas e o sistema de escoramento, porque a quantidade de cubetas a empregar é reduzida e ganha-se a vantagem de poder variar as dimensões das cubetas conforme a edificação. Assim sendo, num pavimento onde a quantidade de cubetas é muito reduzida, o emprego de laje lisa maciça pode representar uma alternativa menos onerosa.

O artigo de Marcellino & Dal Prá (2010) já havia identificado que, num estudo preliminar de lajes bidirecional, determinadas alternativas de pavimentos se sobressaem sobre as demais em alguns aspectos. Verifica-se que para lajes bidirecionais e vãos de 5 ou mais metros, o custo dos materiais da laje maciça começa a ficar parecido com os custos das lajes nervuradas, sendo então a adoção de laje maciça viável para pequenos e médios vãos. Ou seja, quando o vão ultrapassa 5 metros, a deformabilidade dessas lajes maciças cresce demais, podendo em alguns casos, até mesmo inviabilizar seu uso.

As quantidades de concreto e de aço para vigas são muito maiores na alternativa convencional do que nas outras porque as outras possuem vigas apenas nas bordas, enquanto que a alternativa convencional possui vigas intermediárias. Se os projetos deste trabalho possuísem lajes com uma maior quantidade de quadros, este efeito se potencializaria.

e) Comparativo de consumos no pavimento para cada alternativa

Este tópico relaciona os consumos de materiais em cada alternativa, para cada um dos edifícios.

i) Quanto às fôrmas, em Outubro/2012, para a região de Florianópolis (SC), o custo unitário de fôrmas para lajes maciças é cerca de 1,39 vezes o custo das fôrmas para lajes nervuradas, já considerando materiais e mão de obra. Assim sendo, num cenário onde as fôrmas são variável importante, o custo para edificar a opção de pavimento com laje lisa maciça é cerca de 5 vezes aquele da alternativa de pavimento com laje lisa nervurada, para o Comercial Rubi. Para o Comercial Maranello, este custo é cerca de 4 vezes.

ii) Quanto ao volume de concreto, o Quadro 10 mostra a espessura média, obtida pela razão entre o volume de concreto do pavimento e a área estrutural.

Quadro 10 - Espessura média do pavimento

Espessura média (pavimento)	Comercial Rubi A = 388,07 m ² Espessura média (cm)	Comercial Maranello A = 285,95 m ² Espessura média (cm)
Alt. 1: Laje lisa maciça h=16	16,9	19,0
Alt. 2: Laje lisa maciça h=23	24,6	25,6
Alt. 3: Laje lisa nervurada	20,4	27,1
Alt. 4: Convencional	17,5	17,4

O Quadro 10 traz que, para os projetos de lajes lisas maciças, a espessura média do pavimento é maior que a espessura da laje pela consideração das vigas de bordo.

A maior diferença encontra-se para a laje lisa nervurada, visto que no Comercial Maranello é feito uso de opção de laje nervurada com maior altura que para o Comercial Rubi.

Para a alternativa Convencional, a espessura média resultou semelhante entre os projetos porque os vãos praticados são da mesma ordem de grandeza.

Do Quadro 10 pode-se inferir que, num cenário onde o volume de concreto é muito mais importante que o consumo de aço. Para o

Comercial Rubi, as alternativas de laje lisa maciça com $h=16$ cm e convencional são as melhores opções, então se escolhe a alternativa de laje lisa maciça com $h=16$ cm se o conhecimento desta técnica for difundido na região e se o tempo com recortes em fôrmas for uma variável importante; ou então laje em sistema convencional se a mão-de-obra não tiver o conhecimento para executar lajes lisas maciças.

Já para o Comercial Maranello, a alternativa de laje convencional mostra-se menos custosa, sendo que tal diferença em relação ao Comercial Rubi deve-se à distribuição das vigas de contorno (não são o mesmo projeto). A alternativa de laje lisa nervurada perde vantagem quando confrontada com as outras, pelo motivo da opção pelo uso de cubetas com maior altura, motivado pelos efeitos de algumas especificidades arquitetônicas.

Ainda sobre o volume de concreto, mostra-se significativo o consumo da opção de laje lisa nervurada. Pode-se observar que os valores de espessura média encontrados para o Comercial Rubi são de ordem de grandeza compatível com aqueles encontrados para o Comercial Maranello. A maior variação está na laje lisa nervurada do projeto Comercial Maranello, que apresenta maior consumo, causado pela consideração das faixas maciças e da escolha da cubeta, conforme se explica no item Desenvolvimento.

Pequenas variações no volume de concreto admitem-se pela consideração das vigas no cômputo destes quantitativos.

iii) Quanto ao consumo de aço, o Quadro 9 mostra que a alternativa mais econômica, para ambos os projetos é a alternativa convencional, seguida pela alternativa de pavimento com laje lisa nervurada. Para a alternativa de pavimento com laje convencional, a variação das alturas das vigas ocasiona variações nos consumos de aço.

iv) Se levar em consideração um cenário que represente os custos desta região de Florianópolis, sem nenhuma especificidade, pode-se afirmar que a alternativa de pavimento com laje lisa nervurada é a melhor escolha, seguida pela alternativa de pavimento com laje convencional.

Conforme já explicado, o tratamento das informações com unidades monetárias é uma limitação que pode ocasionar imprecisões nos resultados porque os custos dos insumos e da mão-de-obra variam diferentemente conforme o passar do tempo e as características econômicas das localidades.

12 CONCLUSÕES

Verifica-se que algumas das alternativas sobressaem-se às demais em alguns aspectos: a laje lisa nervurada é mais econômica que as outras para a área de formas. Em volume de concreto as escolhas mais vantajosas são de alternativa de laje lisa maciça com espessura 16 cm e convencional. Em consumo de aço, a melhor alternativa é a de convencional, seguida pela alternativa de laje lisa nervurada. Um levantamento de custos para a região de estudo, em outubro/2012 mostra que a alternativa de pavimento com laje lisa nervurada é a melhor escolha, seguida pela alternativa de pavimento com laje convencional.

Afirmar que determinada alternativa é sempre mais viável em detrimento de outra pode ser inadequado, pois cada caso deve ser estudado em particular. Pode-se confirmar isto tendo em vista que determinada escolha pode ser não validada pelo fato de que, apesar de ser menos onerosa, tenha por consequência instalações aparentes onde estas são indesejáveis, ou até mesmo por apresentar nervuras quando se deseja ter teto liso, por exemplo.

Antes mesmo de analisar os projetos, pode-se antever (qualitativamente) alguns comportamentos característicos de cada tipo de laje, como por exemplo, a laje maciça tem vigas intermediárias que podem interferir nos ambientes e a laje nervurada tem melhor aplicabilidade em arquiteturas que sigam alguns parâmetros de modulação.

A prática de projetos mostra que algumas disposições arquitetônicas podem exigir o uso de alguma ou outra tecnologia de laje e podem, até mesmo, descartar o uso de determinada solução de pavimento.

Além disso, à medida que certas especificidades do projeto vão se evidenciando, um sistema construtivo pode ir tornando-se mais viável que o outro. Analisar o impacto financeiro de um pavimento de maneira isolada das condições arquitetônicas pode vir a conduzir a um resultado equivocado. Este trabalho reforça a ideia de que é sempre necessário analisar todas as condições e características da obra para posteriormente definir, para determinado caso, qual alternativa tem o menor custo.

A postura mais responsável é repetir estudos semelhantes para cada projeto em específico e então determinar qual tipo de laje deve ser escolhida. A comparação entre as alternativas para pavimentos sem vigas estudados mostrou que não há como predizer qual é a melhor ou mais econômica, sem antes transcorrer por todas as etapas de projeto estrutural. Após, garantir a compatibilização com os projetos

arquitetônicos e de instalações, para então levantar os custos e confrontá-los com as variáveis qualitativas.

A viabilidade de alguma solução ou outra não deve estar atrelada apenas às questões estruturais, porque a consideração de outras variáveis importantes, tais como a necessidade do uso de forro para ocultar as nervuras, a influência da interferência entre a estrutura, a disposição arquitetônica e as instalações conduzem a resultados mais confiáveis.

O programa de necessidades de cada edificação pode viabilizar uma alternativa que possua custo pouco maior que aquela inicialmente julgada menos onerosa. Além disto, deve-se também levar em consideração até que ponto torna-se viável empregar uma técnica que não é difundida no local, se existe disponibilidade de materiais, se é viável economicamente e estruturalmente.

Verifica-se a importância do uso do aplicativo Eberick V7 que, sob certos cuidados e intervenções, auxilia na obtenção de esforços, dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais que originam os quantitativos que possibilitam parte das análises. Ressalta-se que a necessidade de conhecimento técnico na definição do projeto de estruturas é indispensável para o êxito no julgamento de engenharia, sendo que a ausência desta pode vir a acarretar equívocos.

Estas conclusões servem de ponto norteador e de incentivo para a realização de levantamento de índices e de realização de mais estudos nesta mesma linha de pesquisa.

13 TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos, podem ser realizados estudos que incluam as alternativas em:

- * concreto protendido: caso de pós tração;
- * vigas faixas: viga faixa em uma direção e em duas direções.

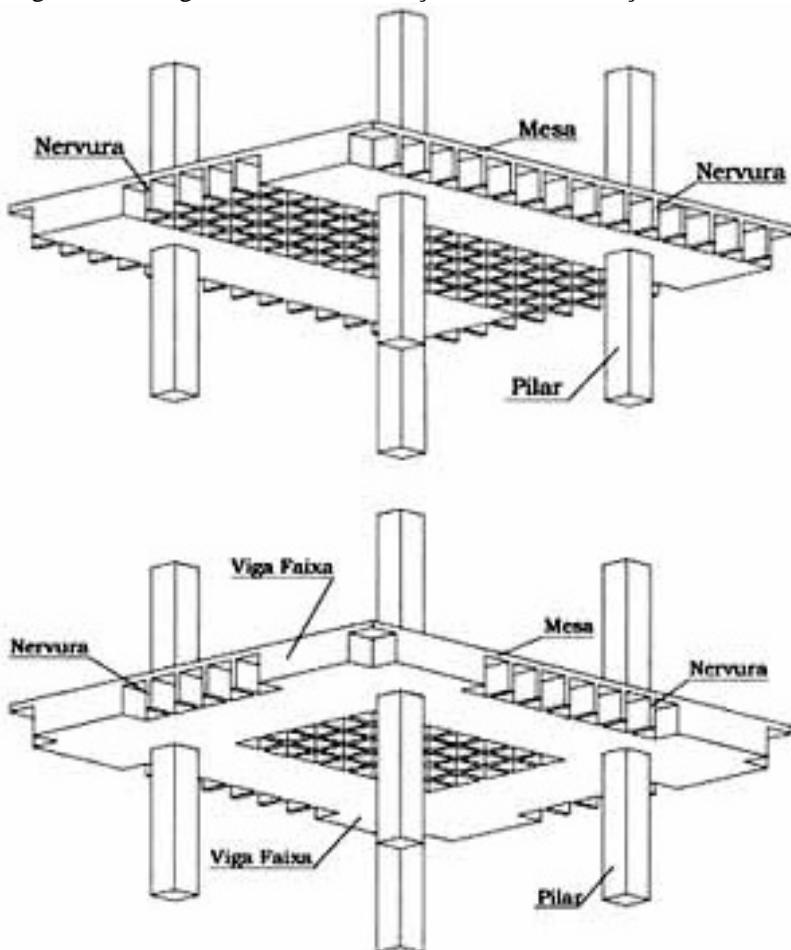


Figura 20 - Alternativas com vigas-faixa

Outra sugestão é aquela já enunciada no item *Combinação das alternativas*, então se pode fazer um estudo considerando o emprego de dois tipos distintos de alternativas para pavimentos (e então estudar não

somente o pavimento, mas a edificação como um todo), obtendo custos minimizados.

No mérito das variáveis, mostra-se oportuno variar o número de pilares, e conseqüentemente a magnitude dos vãos dos quadros das lajes e combinar variações de f_{ck} . Outra sugestão é a avaliação da variação dos índices de consumo conforme altera-se a quantidade de pavimentos.

No quesito custos, pode haver o levantamento de quantitativos e orçamento conforme custos unitários que reflitam diversos locais do país, considerando materiais, mão de obra e considerando as conseqüências de cada opção de laje na composição de custos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) ALBUQUERQUE, A.T. **Análise de alternativas estruturais para edifícios em concreto armado**. 97 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1999.
- 2) ALMEIDA, F. M. F. **Estruturas de pisos de edifícios com a utilização de cordoalhas engraxadas**. 284 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.
- 3) Alto QI. Tecnologia aplicada à engenharia. **Curso Concepção e lançamento do projeto estrutural – Aspectos de contratação, desenvolvimento e finalização**, apostila do curso. Florianópolis, Santa Catarina, 2011.
- 4) Alto QI. Tecnologia aplicada à engenharia. **Curso Master - aplicações**, apostila do curso. Florianópolis, Santa Catarina, 2009.
- 5) Alto QI. Tecnologia aplicada à engenharia. **AltoQi Eberick V6 Gold®**, versão demonstrativa. Florianópolis, Santa Catarina, 2010.
- 6) ARAÚJO, José Milton. **Curso de Concreto Armado**. 2003. Vol. 2. Rio Grande: Editora Dunas.
- 7) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2007.
- 8) _____. **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas**. Rio de Janeiro, 1980.
- 9) ATEX (2011). **Fôrmas ATEX**. Curitiba. Disponível em <www.atex.com.br>. Acesso em: agosto/2011.
- 10) AVILA, A. V. & JUNGLES, A. E. **PLANEJAMENTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. Apostila. Florianópolis. 2003.
- 11) CARVALHO, R. C.; Filho, Jasson Rodrigues de Figueiredo – **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. Volume 1. São Carlos, São Paulo, 2005.
- 12) CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. – **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. Volume 2. São Carlos, São Paulo, 2009.
- 13) CAVALARO, S. H. P.; CARBONARI, G. **Avaliação da viabilidade econômica da utilização de concreto de alto desempenho e lajes planas protendidas em edifício residencial – estudo de caso**. Seminário: Ciências exatas e tecnológicas, 2006. Anais. Londrina: UEL.
- 14) CHING, F. D. K., ONOUE, B. S. & ZUBERBUHLER, D., **Sistemas Estruturais Ilustrados: padrões, sistemas e projetos**. Porto Alegre: Bookman, 2010. 320 p.

- 15) Cype. **CypeCAD 2010**, versão comercial. Florianópolis, Santa Catarina, 2012.
- 16) CORDOVIL, F. A. B. **Lajes de concreto armado: Punção**. Florianópolis (SC): Ed. da UFSC, 1997. 222p.
- 17) DAL PRÁ, A. A. **Projeto de edificação residencial em concreto armado**. 2007. 112 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (SC), 2007.
- 18) DAMASCENO, L. S. R.; Oliveira, D. R. C. **Análise experimental de lajes lisas unidirecionais de concreto armado com pilares retangulares ao punçionamento**. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, 2007. Anais. Belém: UFPA.
- 19) DUARTE, Heraldo. **Aspectos da análise estrutural das lajes de edifícios de concreto armado**. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 1998.
- 20)
- 21) FARIA, E. L. **Projeto de lajes planas protendidas via Método dos Elementos Finitos e Pórticos Equivalentes**. Belo Horizonte. Dissertação – Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.
- 22) ELLWANGER, R. J. **Estruturas de edifícios altos**. 83 p., 29 cm. Programa de pós graduação em engenharia civil/UFGRS. Porto Alegre (RS), outubro/2002.
- 23) FERREIRA, M. A. S. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 239 p. Programa de pós graduação em engenharia civil / UFSCar. São Carlos (SP), 2005.
- 24) FIGUEIREDO FILHO, J.R. (1989). **Sistemas estruturais de lajes sem vigas: subsídios para o projeto e execução**. São Carlos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.
- 25) FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. São Paulo: Ed. PINI, 1995.
- 26) IBRACON (2006). **Comentários técnicos e exemplos de aplicação da NB-1**. São Paulo. Instituto Brasileiro do Concreto.
- 27) LOZOVEY, A. C. R.; REBÊLO, R. R. **Análise comparativa de consumo de material de edifícios variando-se o f_{ck} da estrutura**. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto, 11, 2010, Fortaleza. Anais.
- 28) MARCELLINO, N. A.. **Estudos avançados em estruturas de concreto armado**. Florianópolis: Notas de aula, 2009.
- 29) MARCELLINO, N. A.; DAL PRÁ, A. A. **Avaliação das lajes lisas em pavimentos de edificações**. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto, 11, 2010, Fortaleza. Anais. Florianópolis: PPGEC/UFSC.

- 30) MARCELLINO, N. A.; DAL PRÁ, A. A. **Avaliação das lajes lisas em pavimentos de edificações**. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto, 2010, Fortaleza. Anais. Florianópolis: ECV/UFSC.
- 31) MARCELLINO, N. A.; DAL PRÁ, A. A. **Avaliação dos esforços de flexão em pavimento de lajes lisas de concreto armado**. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. Anais. Florianópolis: ECV/UFSC
- 32) MARCELLINO, N. A.; DAL PRÁ, A. A. **Avaliação de alternativas para pavimentos em dois projetos de edificações comerciais**. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto, 2012, Maceió. Anais. Florianópolis: ECV/UFSC.
- 33) MELGES, J. L. P. **Análise experimental da punção em lajes de concreto armado e protendido**. 414p. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.
- 34) MELGES, J. L. P. **Punção em Lajes: Exemplos de Cálculo e Análise Teórico – Experimental**. 180p. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1995.
- 35) NAPPI, S. C. B. **Análise comparativa entre lajes maciças, com vigotes pré-moldados e nervuradas** – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Florianópolis: UFSC, 1993.
- 36) PUEL, A. **Modelagem de lajes planas simétricas e assimétricas em concreto armado – análise integrada laje x pilar** – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - Florianópolis: UFSC, 2009. 152 p.
- 37) RABELLO, F. T. **Análise comparativa de normas para punção em lajes de concreto armado** – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - Florianópolis: UFSC, 2010. 248 p.
- 38) REGINO, G. **Como qualificar a mão de obra na construção civil: metodologia para atualização profissional no canteiro de obra**. 1.ed. São Paulo: PINI, 2010. 155 p. ISBN 978-85-7266-233-8.
- 39) SILVA, A. R. **Análise comparativa de custos de sistemas estruturais para pavimentos de concreto armado** – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas. Minas Gerais: UFMG, 2002. 235p.
- 40) SILVA, Marcos Alberto Ferreira da. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado** – Programa de Pós Graduação em Construção Civil. São Carlos: UFSCar, 2005.. 239p.
- 41) SPOHR, V. H. **Análise comparativa: sistemas estruturais convencionais e estruturas de lajes nervuradas** – Dissertação.

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Santa Maria: UFSM, 2008. 108p.

42) STRAMANDINOLI, J. S. B. **Contribuições à análise de lajes nervuradas por analogia de grelha.** 2003. 178 f. Dissertação (Mestrado em estruturas) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

- 1) BARES, R. (1972). **Tablas para el cálculo de placas y vigas-paredes**. Barcelona, Editorial Gustavo Gili S/A.
- 2) HAHN, J. **Vigas continuas, pórticos, placas y vigas flotantes sobre lecho elastico**, Barcelona, Editorial Gustavo Gili, S.A., 1972.
- 3) HAMBLY, E. C. (1976). **Bridge deck behavior**. Chapman and Hall, London. 272p.
- 4) SLIZARD, R. (1974). **Theory and analysis of plates**. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs.
- 5) TAKEYA, T. et all (1985). **Recomendações para o projeto e a execução da estrutura em lajes-cogumelo pertencentes às UBS do plano metropolitano de saúde**. Relatório. São Carlos, EESC-USP. 31p.