

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

Paula Barth Campani

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES NERVURADAS
SIMPLES E DUPLAS POR ANALOGIA DE GRELHA**

Porto Alegre
dezembro 2011

PAULA BARTH CAMPANI

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES NERVURADAS
SIMPLES E DUPLAS POR ANALOGIA DE GRELHA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Virgínia Maria Rosito d'Avila Bessa

Porto Alegre
dezembro 2011

PAULA BARTH CAMPANI

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES NERVURADAS
SIMPLES E DUPLAS POR ANALOGIA DE GRELHA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande

Porto Alegre, 10 dezembro de 2011

Profa. Virgínia Maria Rosito d'Avila Bessa
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Roberto Domingo Rios (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Rubem Clécio Schwingel (UFRGS)
Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Virgínia Maria Rosito d'Avila Bessa
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Carlos e Angela, pelo
incentivo e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Professora Virgínia Maria Rosito d'Avila Bessa, orientadora deste trabalho, por sua dedicação e engajamento com este, por compartilhar seus conhecimentos com paciência e entusiasmo.

Agradeço à Professora Carin Maria Schmitt, pela imensa dedicação e suporte ao longo deste ano, pela sua disposição e comprometimento no auxílio deste trabalho.

Agradeço aos engenheiros da empresa de cálculo estrutural Estádio 3, pela confiança depositada e dedicação em me passar conhecimentos.

Agradeço aos meus pais, Angela e Carlos, pelo amor e incentivo que sempre me deram, pela boa educação e principalmente por sempre terem acreditado no meu potencial.

Agradeço à minha avó Alsumira, uma pessoa tão especial e um exemplo de superação e generosidade a ser seguido.

Agradeço à minha irmã, Raquel, pelas boas risadas compartilhadas e por ser meu exemplo de determinação.

Agradeço ao meu namorado Renan, pelo incentivo, compreensão, companheirismo e pelos momentos felizes que passamos juntos.

Agradeço à minhas amigas e colegas da Engenharia Civil, por tornar a faculdade mais fácil e divertida.

A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original.

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho versa sobre a análise comparativa entre lajes nervuradas simples e duplas para diferentes configurações estruturais, através da analogia de grelha. Analisando-se o consumo de concreto, aço e fôrmas para cada situação estrutural proposta, é determinado o custo dos materiais para cada solução construtiva em estudo. Para a obtenção dos quantitativos de insumos, as lajes são dimensionadas através da ferramenta computacional CAD/TQS®, que utiliza o método da analogia de grelha para determinar esforços e deslocamentos da estrutura, podendo-se assim, definir a espessura mais indicada para cada laje, considerando o menor dispêndio de materiais. São apresentadas características e definições das lajes nervuradas, simples e duplas, e lajes cogumelo. Os esclarecimentos acerca do funcionamento da analogia de grelhas são feitos para demonstrar o método e suas características. Para o dimensionamento de lajes, são apresentadas as considerações feitas para o projeto, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, como as cargas acidentais mínimas de cálculo, as dimensões pré-estabelecidas para as lajes nervuradas e as distintas armaduras a serem utilizadas nas lajes cogumelo. Ao longo do trabalho, estão dispostos quadros e gráficos com resultados e comparações das espessuras das lajes, dos volumes de concreto e EPS, dos pesos de aço e do custo com materiais em função da configuração estrutural e do tipo de laje nervurada. Com isso, conclui-se, para as condições analisadas neste trabalho, que as lajes nervuradas duplas consomem mais concreto e aço que as lajes nervuradas simples, para a mesma configuração de laje e mesmo deslocamento máximo. Entretanto, esta diferença é amortizada com o aumento das dimensões das lajes. Assim, para grandes vãos entre apoios, acima de 9 metros aproximadamente, a diferença de custo entre as lajes nervuradas simples e duplas é praticamente nula. Percebe-se também, com este trabalho, que as lajes nervuradas duplas necessitam menores espessuras de laje em relação à simples.

Palavras-chave: Lajes nervuradas. Lajes nervuradas simples. Lajes nervuradas duplas. Laje cogumelo. Analogia de grelha. Quantitativos de materiais.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do projeto de pesquisa	15
Figura 2 – Laje nervurada simples com nervuras aparentes	21
Figura 3 – Laje nervurada simples com superfície plana	21
Figura 4 – Laje nervurada contínua	22
Figura 5 – Laje nervurada dupla com material inerte	23
Figura 6 – Ruína por punção em laje cogumelo	26
Figura 7 – Armadura transversal modular	26
Figura 8 – Laje nervurada com maciço representada por uma grelha equivalente	30
Figura 9 – Perímetros críticos em pilares internos	35
Figura 10 – Disposição da armadura de punção e delimitação da superfície crítica C'' .	36
Figura 11 – Armaduras de punção e contra colapso progressivo	37
Figura 12 – Dimensões de vigas e pilares das lajes nervuradas em estudo	39
Figura 13 – Dimensões das nervuras e capas de concreto das lajes nervuradas em estudo	40
Figura 14 – Exemplo de deslocamento da estrutura	41
Figura 15 – Dimensões variadas nas lajes nervuradas em estudo	42
Figura 16 – Espessuras das lajes em centímetros	50
Figura 17 – Diferença de espessura em centímetros	51
Figura 18 – Diferença de espessura em percentual	51
Figura 19 – Volume de concreto em metros cúbicos	53
Figura 20 – Diferença de volume de concreto em percentual	53
Figura 21 – Volume de EPS em metros cúbicos	55
Figura 22 – Diferença de volume de EPS em percentual	55
Figura 23 – Peso de aço em quilos	57
Figura 24 – Diferença de peso de aço em percentual	57
Figura 25 – Taxa de armadura	59
Figura 26 – Custo com materiais em Reais	60
Figura 27 – Diferença de custo com materiais em percentual	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores mínimos das cargas verticais	32
Quadro 2 – Limite para deslocamento	33
Quadro 3 – Dimensões em planta das lajes nervuradas em estudo	43
Quadro 4 – Deslocamentos e espessuras das lajes nervuradas em estudo	44
Quadro 5 – Quantitativos de concreto EPS e fôrmas	45
Quadro 6 – Quantitativos de aço	46
Quadro 7 – Custos com materiais	48
Quadro 8 – Comparação das espessuras das lajes	49
Quadro 9 – Comparação dos volumes de concreto	52
Quadro 10 – Comparação dos volumes de EPS	54
Quadro 11 – Comparação dos pesos de aço	56
Quadro 12 – Taxas de armaduras	58
Quadro 13 – Comparação dos custos com materiais	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	13
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	13
2.2 OBJETIVO DO TRABALHO	13
2.2.1 Objetivo principal	13
2.2.2 Objetivo secundário	13
2.3 PRESSUPOSTO	13
2.4 DELIMITAÇÕES	14
2.5 LIMITAÇÕES	14
2.6 DELINEAMENTO	14
2.6.1 Pesquisa bibliográfica	15
2.6.2 Definição das lajes a serem estudadas	16
2.6.3 Dimensionamento das lajes	16
2.6.4 Quantitativos e custos dos materiais	16
2.6.5 Comparação dos resultados	16
2.6.6 Análise final e conclusões	17
3 LAJES DE CONCRETO ARMADO	18
3.1 LAJES NERVURADAS	19
3.1.1 Lajes nervuradas simples	20
3.1.2 Lajes nervuradas duplas	22
3.2 LAJES COGUMELO	24
3.2.1 Capitel	25
3.2.2 Vigas de borda	27
4 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO	28
4.1 ANALOGIA DE GRELHA	28
4.2 CRITÉRIOS PARA O DIMENSIONAMENTO DAS LAJES	31
4.2.1 Critérios para lajes nervuradas	34
4.2.2 Critérios para lajes cogumelo	35
5 CÁLCULO DAS LAJES NERVURADAS	38
5.1 QUANTITATIVOS DE MATERIAIS	44
5.2 CUSTOS COM MATERIAIS	47
6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	49
6.1 COMPARAÇÃO DAS ESPESSURAS DAS LAJES	49

6.2 COMPARAÇÃO DOS VOLUMES DE CONCRETO	52
6.3 COMPARAÇÃO DOS VOLUMES DE EPS	54
6.4 COMPARAÇÃO DOS PESOS DE AÇO	56
6.5 TAXA DE ARMADURA	58
6.6 COMPARAÇÃO DOS CUSTOS COM MATERIAIS	59
7 CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

A construção civil no Brasil passa por uma grande transformação, o mercado está em crescimento, o que exige dos engenheiros uma melhoria contínua nas técnicas de construção, devido à ampla concorrência trazida por esta ascensão. Na busca de soluções construtivas velozes e econômicas, a utilização de lajes nervuradas cresce mundialmente, por apresentar menores custos em comparação às lajes maciças convencionais, quando projetadas para vencer grandes vãos.

As lajes nervuradas podem ser classificadas conforme a posição das nervuras na sua seção transversal em simples, invertidas e duplas. De acordo com Araújo (2003, p. 144), as lajes nervuradas simples, com nervuras inferiores, funcionam como vigas T para momentos fletores positivos. Nos casos de lajes contínuas, observam-se, nas proximidades dos apoios intermediários, trechos com momento fletor negativo, comprimindo a face inferior da nervura, região em que a área de concreto é reduzida, tornando-se necessário o uso de faixas maciças, também conhecidas como capitéis, para a absorção destes esforços.

Segundo Souza e Cunha (1998, p. 208), em lajes em balanço, nos quais os momentos negativos são predominantes, são comumente utilizadas lajes nervuradas invertidas, com nervuras superiores, que neste caso estarão tracionadas. Porém, em diversos casos, as lajes apresentam regiões com momentos fletores positivos e outras, com negativos. Para tais situações, as lajes nervuradas duplas, com seção transversal I, por funcionar como seção T em ambos os sentidos de momentos, apresentam bons resultados.

Este trabalho tem como objetivo comparar as lajes nervuradas simples e duplas, em função da espessura da laje, consumos de concreto, aço e fôrmas e custo desses materiais, para variadas configurações estruturais. Para o cálculo das lajes foram seguidas as prescrições da Associação Brasileira de Normas Técnicas e utilizada a ferramenta computacional CAD/TQS®, que obtém esforços e deslocamentos da estrutura através da analogia de grelha.

Com os quantitativos obtidos com o detalhamento da laje, foi realizada uma análise de custos, utilizando os preços de mercado dos insumos envolvidos. Visando a melhor compreensão do leitor sobre as diferenças entre lajes nervuradas simples e duplas, os resultados estão dispostos

em quadros e gráficos, possibilitando assim, a comparação entre os dois tipos de lajes nervuradas em questão.

No capítulo 2, após a introdução, tem-se a apresentação das diretrizes de pesquisa do trabalho. Encontra-se a questão de pesquisa, objetivo principal e secundário, pressupostos, delimitações, limitações e delineamento do trabalho. O terceiro capítulo trata de um estudo teórico sobre as lajes nervuradas, simples e duplas, e lajes cogumelo, apresentando suas definições, principais características, vantagens e desvantagens, obtidas através da pesquisa bibliográfica.

No quarto capítulo, são apresentadas as considerações utilizadas para a realização do projeto. No seu primeiro item, é apresentado o método de cálculo utilizado para o dimensionamento das lajes, o método da analogia de grelha. Em seguida são apresentados os critérios utilizados para o dimensionamento das lajes, tais como, cargas acidentais a serem consideradas, condições para o dimensionamento das lajes nervuradas e verificações feitas nas lajes cogumelo.

No capítulo 5, é apresentado o dimensionamento das lajes e apresentados os quantitativos de concreto, aço e fôrmas, assim como o custo total com tais insumos para cada configuração estrutural. No sexto capítulo, os resultados obtidos são comparados e analisados, em forma de quadros e gráficos. O sétimo capítulo apresenta a análise final e conclusões que podem ser feitas, através deste trabalho, sobre as lajes nervuradas simples e duplas.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Neste capítulo, são apresentadas as diretrizes de pesquisa do trabalho, como a questão de pesquisa, objetivo principal e secundário, pressuposto, limitações e delimitações. Por fim, é apresentado o delineamento do trabalho, explicando as etapas que foram desenvolvidas para a realização deste.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual a diferença de custo dos materiais entre as lajes nervuradas simples e duplas, para as configurações estruturais estudadas, nas quais ambos os tipos são passíveis de uso?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a comparação entre lajes nervuradas simples e duplas, em função do custo dos materiais, para variadas configurações estruturais propostas.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário deste trabalho é a verificação da possibilidade de uso das lajes estudadas e, quando adequadas, a determinação das espessuras das lajes para as diferentes configurações estruturais estudadas, utilizando lajes nervuradas simples e duplas.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que o cálculo através da analogia de grelha apresenta resultados satisfatórios para as lajes em questão, assim como o dimensionamento feito pelo

CAD/TQS®, desde que seja adequadamente modelado e com critérios ajustados apropriadamente.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo de lajes lisas nervuradas, simples e duplas, retangulares, com carregamento distribuído e estático, utilizados tipicamente no cálculo de pavimentos destinados ao estacionamento de automóveis.

2.5 LIMITAÇÕES

As limitações do trabalho são abaixo apresentadas:

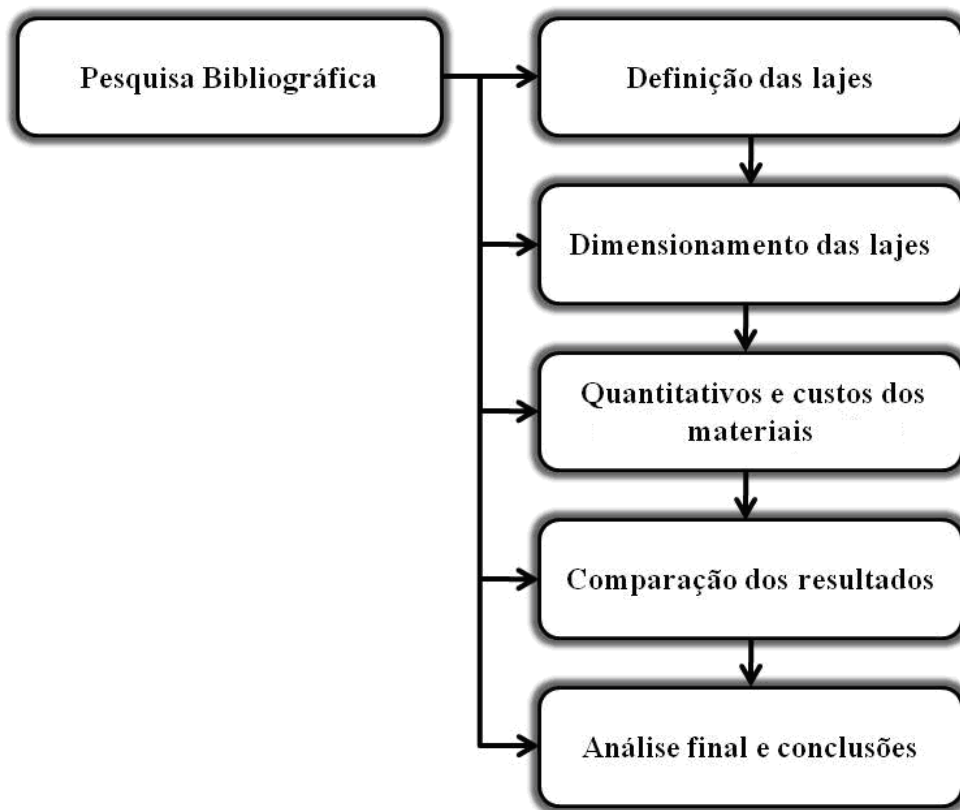
- a) o dimensionamento estrutural de cada configuração de lajes é realizado somente utilizando a ferramenta computacional CAD/TQS®;
- b) as lajes analisadas são lajes lisas, ou seja, apoiadas diretamente em pilares com maciços de mesma espessura da laje e com vigas apenas nas bordas do pavimento;
- c) a análise comparativa se refere apenas ao consumo de concreto, aço e fôrmas;
- d) para estimativa de custos dos materiais, foram utilizados preços médios de mercado, obtidos junto a uma construtora de Porto Alegre;
- e) o trabalho ficou limitado ao cálculo das lajes bidirecionais, isto é, lajes armadas em duas direções;
- f) as lajes nervuradas simples e duplas utilizam EPS como material de enchimento.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, esquematizadas na figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição das lajes a serem estudadas;
- c) dimensionamento das lajes;
- d) quantitativos e custos dos materiais;
- e) comparação dos resultados;
- f) análise final e conclusões.

Figura 1 – Diagrama das etapas do projeto de pesquisa



(fonte: elaborado pela autora)

As seis etapas dispostas na figura 1 são descritas e melhor detalhadas nos próximos itens.

2.6.1 Pesquisa bibliográfica

Durante a pesquisa bibliográfica, buscou-se o aprofundamento do conhecimento sobre lajes nervuradas e cogumelo, através de livros de estruturas de concreto armado, teses de doutorado a respeito de métodos de cálculo e normas relacionadas ao assunto, tudo isso com auxílio de professores e profissionais da área de estruturas. Por ser uma etapa de obtenção de informações, teve maior duração do que outras, estendendo-se de antes mesmo do início do trabalho até sua conclusão.

2.6.2 Definição das lajes a serem estudadas

Na etapa de definição das lajes, primeiramente determinou-se a configuração estrutural das lajes utilizadas, as cargas acidentais e permanentes consideradas no cálculo, a resistência à compressão do concreto, entre outros parâmetros a serem empregados, visando obter resultados mais claros na análise comparativa proposta.

2.6.3 Dimensionamento das lajes

Após a definição dos parâmetros a serem utilizados, foram realizados os dimensionamentos das lajes, através da ferramenta computacional CAD/TQS®, que utiliza o método da analogia de grelha para esse cálculo. Primeiramente foi feito o lançamento da estrutura no *software*, que, com as dimensões das lajes nervuradas e carregamentos aplicados, determina os esforços e deslocamentos por nervura da laje. Com estes esforços, são determinadas as áreas de armaduras necessárias.

2.6.4 Quantitativos e custos dos materiais

Com o dimensionamento da estrutura foi possível calcular o volume de concreto, a quantidade de aço (expressas em quilos), o volume de EPS, material de enchimento utilizado, e a área de fôrmas para os dois tipos de laje nervurada. Após a obtenção dos respectivos preços de mercado de cada um dos insumos, foram calculados os gastos totais com materiais, para cada laje proposta.

2.6.5 Comparação dos resultados

Com os resultados das etapas anteriores, foi feita a comparação e análise dos resultados obtidos, definindo-se qual a diferença de custo com materiais entre as lajes nervuradas simples e duplas e suas respectivas espessuras para cada configuração estrutural proposta. A comparação dos resultados é feita para a espessura da laje utilizada, volume de concreto, volume de EPS, peso de aço e custo total da estrutura.

2.6.6 Análise final e conclusões

Na última etapa, análise final e conclusões deste trabalho, foi feita a comparação das lajes com a pesquisa bibliográfica. Na conclusão do trabalho foi feita a análise de quais as vantagens e desvantagens de cada um dos dois tipos de laje nervurada e em quais situações são melhores aplicadas.

3 LAJES DE CONCRETO ARMADO

Figueiredo Filho (1989, p. 1) define laje como uma placa, folhas planas sujeitas principalmente a ações normais ao seu plano, feitas de concreto armado ou protendido. Souza e Cunha (1998, p. 23) classificam as lajes sob quatro critérios: forma, natureza, tipo de apoio e tipo de armação. Assim, quanto:

- a) à forma, as lajes podem ser retangulares, quadradas, triangulares, em L, circulares, etc.;
- b) à natureza, existem lajes maciças, nervuradas, mistas, em grelha, duplas e pré-fabricadas;
- c) ao tipo de apoio, as lajes podem ter apoio contínuo, discreto e em apenas um trecho de sua área;
- d) ao tipo de armação, elas podem ser armadas em uma só direção ou em duas, também chamada de armadas em cruz ou bidirecional.

Segundo Takeya¹ et alli (1985 apud FIGUEIREDO FILHO, 1989, p. 5):

A principal finalidade de uma estrutura é resistir às ações a ela aplicadas, de modo que seja possível executar uma obra de engenharia que cumpra com as finalidades que dela se requer. Entretanto, não basta a-uma estrutura resistir satisfatoriamente a uma série de ações para que seja considerada boa; é preciso que o faça de uma maneira racional, com bom aproveitamento das características dos materiais e que atenda adequadamente às necessidades arquitetônicas e funcionais da edificação com custo aceitável, sem prejuízo das condições de segurança exigidas.

Comumente são utilizadas lajes maciças nos pisos dos edifícios de concreto armado. Porém, quando projetadas para vencer grandes vãos, essas lajes demandam espessuras tão grandes que a maior parte do carregamento passa a ser constituído por seu peso próprio, o que torna essa solução antieconômica (ARAÚJO, 2003, p. 143).

Figueiredo Filho (1989, p. 8) comenta que a redução de custo é uma premissa básica na escolha de uma solução estrutural e construtiva. Quando as possíveis alternativas apresentam desempenhos estruturais, construtivos, de qualidade e segurança equivalentes, o fator custo será determinante nesta escolha.

¹ TAKEYA, T. et alli. **Recomendações para o projeto e a execução da estrutura em lajes-cogumelo pertencentes as UBS do plano metropolitano de saúde.** São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1985. Relatório.

Como visto anteriormente, as lajes podem ser de vários tipos segundo seu método construtivo (maciças, nervuradas, duplas, cogumelo, etc.). Nesse trabalho será feita a comparação entre lajes nervuradas simples e duplas, utilizando uma laje lisa com vigas apenas nas bordas. Com isso, nos próximos itens deste capítulo, serão apresentadas algumas características e definições importantes em relação às lajes nervuradas e cogumelo.

3.1 LAJES NERVURADAS

As lajes nervuradas são definidas pela NBR 6118 da seguinte forma: “[...] são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos está localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 86). As lajes nervuradas demandam uma altura cerca de 50% maior que a das lajes maciças, mas seu peso e consumo de concreto são inferiores. Estima-se que as lajes nervuradas tendem a ser mais econômicas quando projetadas para vencerem vãos acima de oito metros, aproximadamente (ARAÚJO, 2003, p. 144).

Entre as vantagens das lajes nervuradas, pode-se relacionar segundo Souza e Cunha (1998, p. 207):

- a) estruturas mais leves em grandes vãos;
- b) quando utilizado o material de enchimento, normalmente apresentam melhores isolamentos térmicos e acústicos do que as lajes maciças de concreto;
- c) a estrutura, para grandes vãos, geralmente apresenta resultados mais econômicos que lajes maciças e que as lajes cogumelo.

Também de acordo com Souza e Cunha (1998, p. 207-208), as lajes nervuradas podem apresentar as seguintes desvantagens e/ou exigir cuidados especiais na execução:

- a) quando utilizado tijolos como material de enchimento, se os mesmos não forem devidamente molhados antes da concretagem, poderá ocorrer a absorção de água do concreto, tornando mais difícil o adensamento, o que leva muitas vezes ao acréscimo de água inapropriado durante a execução, aumentando o fator água/cimento, que acarreta na diminuição da resistência do concreto;
- b) a passagem de eletrodutos, não deve ser feita na mesa de concreto da laje, pois pode vir a reduzir a resistência desta;
- c) a distribuição das cargas concentradas não é feita de forma tão eficiente quanto nas lajes maciças.

As lajes nervuradas podem ser classificadas de acordo com o espaçamento entre suas nervuras. Se essas apresentam espaçamentos diferentes nas duas direções, a laje é ortotrópica. Nos casos nos quais os espaçamentos são iguais, a laje é isotrópica, assim como as lajes maciças. A mesma classificação pode ser feita quanto às dimensões das nervuras nas duas direções (ARAÚJO, 2003, p. 147).

As lajes nervuradas podem também ser classificadas em três tipos, conforme a posição das nervuras na sua seção transversal:

- a) simples (seção T), mais comumente utilizada;
- b) invertida (seção T invertida), muito utilizada em lajes em balanço;
- c) dupla (seção I), recomendada para lajes contínuas.

Nos itens seguintes, serão mais bem definidas e conceituadas as lajes nervuradas simples e duplas, que são o enfoque da análise comparativa deste trabalho.

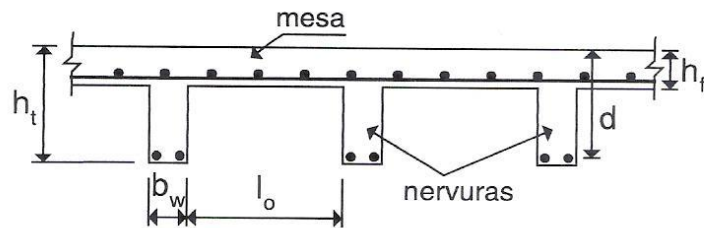
3.1.1 Lajes nervuradas simples

Segundo Araújo (2003, p. 143):

Para reduzir o peso próprio da estrutura, pode-se adotar a solução em lajes nervuradas. Nessas lajes, a zona de tração é constituída por nervuras entre as quais podem ser colocados materiais inertes, de forma a tornar plana a superfície externa. Os materiais inertes devem ter peso específico reduzido em comparação com o peso específico do concreto, podendo ser empregados tijolos cerâmicos furados, blocos de concreto leve, isopor, etc. Alternativamente, os espaços entre as nervuras podem ser preenchidos com formas industrializadas que, após sua retirada, deixam à mostra as nervuras da laje.

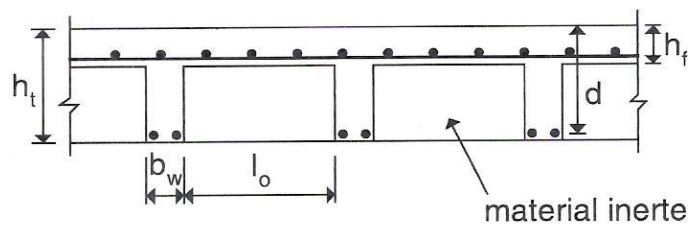
A figura 2 mostra um exemplo de laje nervurada simples com as nervuras aparentes, isto é, na região inferior da laje o concreto maciço foi substituído por nervuras intercaladas por espaços vazios. Na figura 3, os espaços vazios são preenchidos por um material inerte, com peso específico menor que o concreto, para deixar plana a superfície inferior e para facilitar a execução desta laje.

Figura 2 – Laje nervurada simples com nervuras aparentes



(fonte: ARAÚJO, 2003, p. 144)

Figura 3 – Laje nervurada simples com superfície plana

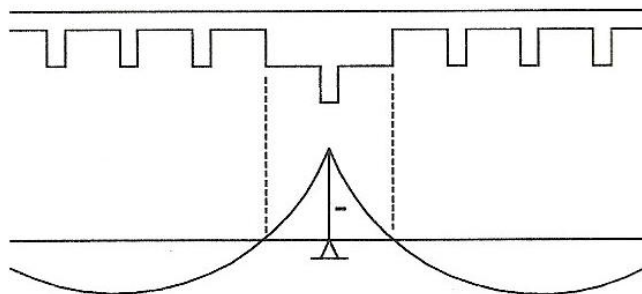


(fonte: ARAÚJO, 2003, p. 143)

A substituição ou eliminação de concreto na parte inferior da seção é possível, pois, esta zona está tracionada. A resistência à tração do concreto é aproximadamente 10% da sua resistência à compressão. Com isso, pode-se ignorar a resistência a tração do concreto e dimensionar as nervuras para resistir a tais esforços.

Nas lajes nervuradas simples, com capa de concreto superior, em casos nos quais a laje for contínua, torna-se necessário que as cubetas próximas aos apoios intermediários, que geram picos de momentos fletores negativos, sejam preenchidas com concreto, também conhecidas como maciços, conforme indicado na figura 4 (ARAÚJO, 2003, p. 144).

Figura 4 – Laje nervurada contínua



(fonte: ARAÚJO, 2003, p. 144)

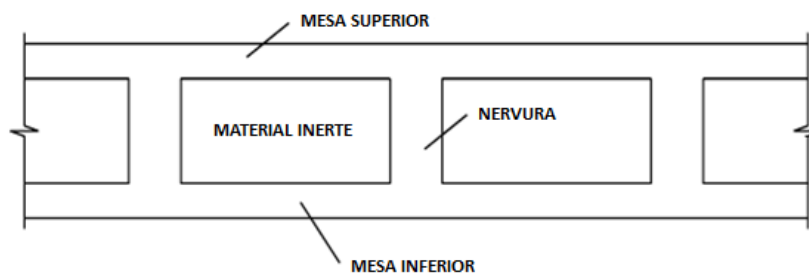
3.1.2 Lajes nervuradas duplas

O projeto arquitetônico moderno exige o emprego de estruturas versáteis e com liberdade de criação. O que conduz ao emprego de lajes com grandes vãos sem nervuras aparentes, também conhecidas como teto liso. Este pode ser obtido por meio de lajes apoiadas diretamente sobre os pilares, formando a chamada laje cogumelo, ou por meio de lajes nervuradas duplas (ROCHA, 1988, p. 9).

As lajes nervuradas duplas têm seção transversal I, ou seja, tanto para momento fletor positivos quanto para os negativos, as nervuras estarão funcionando como vigas T, comprimindo a mesa de concreto. Com isso, as lajes nervuradas duplas são recomendadas para lajes contínuas, nos quais ocorrem ambos os sentidos de momentos.

A laje nervurada dupla é composta por mesas de concreto superior e inferior, com parte do concreto interno substituído por material inerte ou sem material algum, com o intuito de reduzir o peso próprio da estrutura. A figura 5 mostra um exemplo da seção transversal de uma laje nervurada dupla na qual, no seu interior, o concreto foi substituído por material inerte, de baixo peso específico em relação ao concreto, que ficará enclausurado dentro da laje.

Figura 5 – Laje nervurada dupla com material inerte



(fonte: elaborado pela autora)

Alternativamente à utilização de material inerte entre as mesas, há a recomendação de uso uma fôrma no interior da laje, também conhecido como **caixão perdido**, pois essa fôrma também não poderá ser retirada após a concretagem. Produzida na maioria das vezes em madeira, por ser um material de baixo custo, esse método de execução é pouco utilizado atualmente, pois demanda muito tempo para a fabricação dessas caixas (ROCHA, 1988, p. 48).

De acordo com Rocha (1988, p. 59), “As lajes em forma de teto duplo são muito leves e podem constituir um sistema extremamente barato quando for bem projetado, tirando-se o máximo partido dos processos modernos de cálculo e execução.”. As lajes nervuradas duplas, por apresentarem capa inferior de concreto, dispensam o uso de forro ou revestimento da parte inferior da laje, soluções utilizadas para encobrir o material de enchimento de lajes nervuradas simples.

Segundo Souza e Cunha (1998, p. 208), a grande desvantagem das lajes nervuradas duplas, em relação às nervuradas simples, é que a concretagem deve ser feita em duas etapas: primeiramente a concretagem da laje inferior, já com estribos posicionados quando necessários, seguida da concretagem das nervuras e capa superior. O intervalo entre essas deve ser suficiente para a cura do concreto e posicionamento dos ferros e material de enchimento.

3.2 LAJES COGUMELO

Conforme a NBR 6118, “Lajes-cogumelo são lajes apoiadas diretamente em pilares com capitéis, enquanto lajes lisas são as apoiadas nos pilares sem capitéis.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 86). Neste trabalho foram utilizadas lajes nervuradas com maciços de mesma espessura das lajes, o que defini uma laje lisa. Porém, seu comportamento e dimensionamento são similares aos de lajes cogumelo.

A laje cogumelo não é um tipo de estrutura que pode ser utilizada em qualquer situação. Quando necessária a utilização de cálculos aproximados, é conveniente que os pilares das lajes cogumelos estejam o mais alinhados possível, formando uma malha ortogonal e proporcionando uma distribuição mais uniforme dos esforços (FIGUEIREDO FILHO, 1989, p. 13).

Segundo Souza e Cunha (1998, p. 226), as principais vantagens das lajes cogumelo em relação à tradicional solução de lajes compostas por pilares e vigas são:

- a) geralmente mais econômicos para grandes carregamentos;
- b) reduz o pé direito e facilita a passagens de dutos sob sua face inferior;
- c) fôrmas mais simples e econômicas;
- d) facilidade e agilidade na execução;
- e) maior ventilação e iluminação, pela ausência de vigas que interferem na circulação de ar e entrada de luz.

As lajes cogumelo podem ser nervuradas, reduzindo o peso próprio, consumo de concreto, cargas nos pilares e fundações, tornando-se mais econômicas. A região dos apoios não deve ser nervurada, pois, há neste, uma grande concentração de esforços, principalmente os de cisalhamento. Geralmente, as lajes cogumelo nervuradas são empregadas em casos nos quais as ações ou vãos exigem lajes de grande espessura, principalmente na região dos pilares (FIGUEIREDO FILHO, 1989, p. 15).

No estudo comparativo desenvolvido nesse trabalho, será utilizada uma laje lisa nervurada, com maciços e vigas de borda de mesma espessura que as nervuras da laje. Nos próximos itens, será descrita as funções dos capitéis, principal elemento da laje cogumelo, em seguida determinadas as vantagens de se colocar vigas nas bordas, justificando a escolha da laje utilizada.

3.2.1 Capitel

Segundo Araújo (2003, p. 159), a capacidade de resistência das lajes cogumelo é determinada pelas tensões de flexão e principalmente pelas tensões tangenciais de punção geradas pelo apoio da laje sobre o pilar. É função do capitel, reduzir tais tensões de cisalhamento, evitando o punctionamento da laje pelo pilar. O capitel nada mais é que um aumento da espessura da laje nas proximidades da ligação com o pilar.

De acordo com Figueiredo Filho (1989, p. 87):

Na região da ligação da laje com o pilar, além da força cortante de alta intensidade atuante, pode ocorrer também a ação de grandes momentos fletores, que só não causam problemas em pilares interiores de lajes simétricas, carregadas também simetricamente e não sujeitas a esforços laterais, pois nesse caso os momentos na laje se auto equilibram.

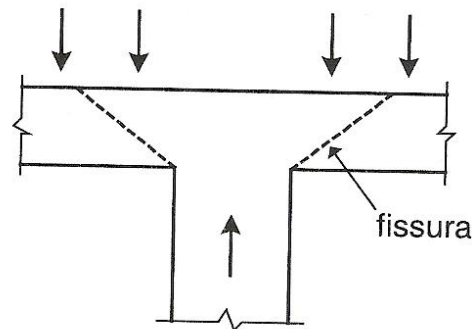
A punção é o estado limite último por cisalhamento entorno de forças concentradas. Sua análise é diferente daquela realizada para o estado limite último por força cortante. O cálculo da punção é de extrema importância para o dimensionamento de lajes cogumelo, pois, a capacidade de resistência destas lajes, esta limitada por essas tensões geradas nos apoio das lajes sobre os pilares (ARAÚJO, 2003, p. 163).

Segundo Figueiredo Filho (1989, p. 86):

O fenômeno da punção ocorre quando uma força concentrada (ou agindo em uma pequena área) aplicada em uma placa provoca a sua perfuração. No caso dos sistemas estruturais de lajes sem vigas o pilar aplica, diretamente na laje, uma força concentrada de alta intensidade, o que pode causar a punção da laje pelo pilar e, conseqüentemente, a ruína da estrutura. Essa ruína ocorre na forma de uma ruptura frágil e abrupta, sem qualquer aviso prévio, o que impossibilita a tomada de medidas preventivas.

Araújo (2003, p. 163) explica que “A ruptura por punção se dá com a propagação de fissuras inclinadas através da seção da laje, com uma inclinação na ordem de 30°, como indicado na figura [...] [6].”.

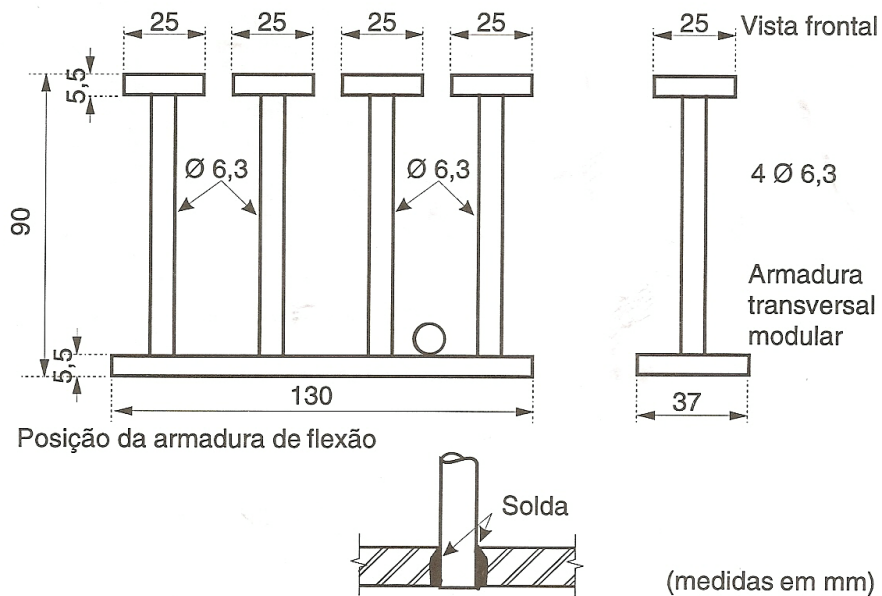
Figura 6 – Ruína por punção em laje cogumelo



(fonte: ARAÚJO, 2003, p. 164)

O uso de estribos convencionais e armaduras transversais, não são suficientes para evitar a ruptura do concreto devido à punção. Para contornar essa dificuldade, faz-se o uso de estribos perfeitamente retilíneos, com ancoragem mecânica nas extremidades. Essa armadura transversal modular, também chamada de *studs*, é feita de chapas de aço soldada, com formato e exemplo de dimensões indicados na figura 7 (FUSCO, 1995, p. 273-274).

Figura 7 – Armadura transversal modular



(fonte: FUSCO, 1995, p. 275)

3.2.2 Vigas de borda

As bordas das lajes cogumelo podem ser livres ou apoiadas, em pilares ou em vigas. Entretanto, de acordo com Fusco (1995, p. 268), as bordas são regiões críticas da laje cogumelo, particularmente em seus cantos, e são nelas que ocorre grande parte das deficiências estruturais. Com isso, o autor recomenda, sempre que possível, o emprego de vigas de apoio nas bordas.

Segundo Figueiredo Filho (1989, p. 20-21) as lajes com vigas apenas nas bordas dos pavimentos melhoram o comportamento do sistema em relação aos seguintes pontos:

- a) eliminam esforços de punção nos pilares externos, que são mais suscetíveis a estes esforços, em função de seu menor perímetro crítico;
- b) diminuem deslocamentos transversais nas bordas externas dos pavimentos;
- c) ajudam a evitar a propagação de fogo em caso de incêndios nos casos onde as vigas de borda são diretas (não invertidas);
- d) proporcionam maior rigidez às ações laterais, melhorando a estabilidade global do edifício.

4 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

Neste capítulo, será apresentado o método utilizado para o cálculo das lajes utilizadas na análise comparativa, o método da analogia de grelha. Em seguida, serão apresentados os critérios utilizados para dimensionar as lajes cogumelo e nervuradas, segundo as recomendações da NBR 6118/2007.

4.1 ANALOGIA DE GRELHA

De acordo com Figueiredo Filho (1989, p. 29), o crescente uso das técnicas computacionais vem gerando grandes avanços nas análises de placas, possibilitando o cálculo aproximado de sistemas de lajes com formas, carregamentos e espessuras irregulares. Dentre os métodos que, para sua aplicação a problemas reais necessitam o uso de computadores, o autor destaca os métodos das diferenças finitas, elementos finitos e da analogia de grelha. Neste trabalho este último método será detalhado.

Segundo Carvalho (1994, p. 16), a análise de placas por analogia de grelha é um procedimento de fácil compreensão e aplicação, que pode ser usado para o cálculo de deslocamentos e esforços em pavimentos de edifícios. Figueiredo Filho (1989, p. 52) ressalta que, o método apresenta baixos custos de processamento e se mostra bastante preciso para uma grande variedade de placas.

Segundo Timoshenko e Woinowsky² (1959 apud CARVALHO 1994, p. 20) inicialmente, a analogia de grelha foi utilizada por Marcus, para calcular placas com bordas verticalmente indeslocáveis. Porém, como Figueiredo Filho (1989) demonstra ao longo de sua tese, o conceito de analogia de grelha pode da mesma forma, ser estendido para o caso de lajes apoiadas diretamente sobre pilares, as lajes cogumelo anteriormente citadas no trabalho. Neste caso, os pilares são considerados apoios indeslocáveis.

O método da analogia de grelha consiste em substituir uma placa por uma malha equivalente de vigas, formando a chamada grelha análoga. Nessa, cada encontro entre as barras da grelha é considerado um nó (FIGUEIREDO FILHO, 1989, p. 52).

² TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY, K. **Theory of plates and shells**. Tokyo: McGraw-Hill, 1959.

As cargas distribuídas, segundo Carvalho (1994, p. 20), se dividem entre os elementos da grelha de acordo com a área de influência de cada elemento. Nos casos nos quais a carga for concentrada, com seu ponto de aplicação não diretamente sobre um nó da grelha, tal carga deve ser distribuída entre os nós próximos, utilizando-se valores equivalentes de cargas em cada ponto, adequando-se a malha.

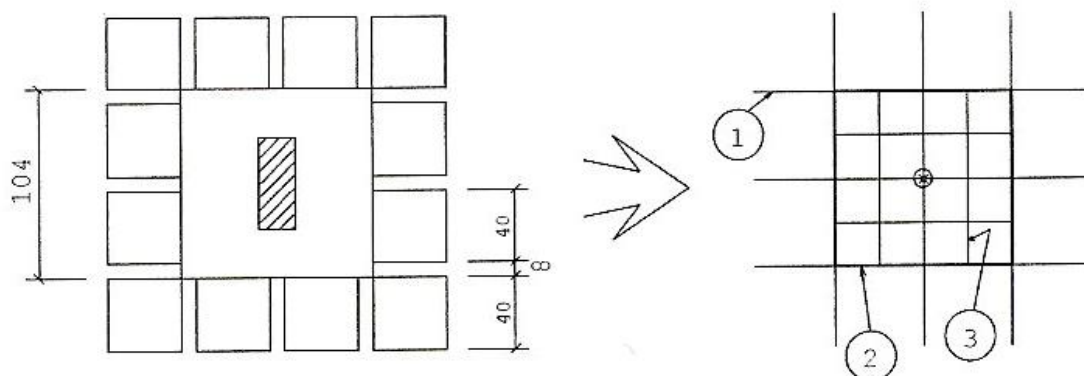
Na analogia de grelha, os elementos da estrutura são representados por barras. Com objetivo de simular a seção transversal de cada elemento, o modelo determina inércias à torção e flexão para cada componente da grelha.

Carvalho (1994, p. 20) indica que:

As rigidezes à torção e à flexão da placa nas duas direções são tratadas como concentradas nos elementos correspondentes da grelha equivalente. Devem ter valores tais que ao se carregar as duas estruturas, a real e a da grelha equivalente, obtenha-se a mesma deformação e esforços internos iguais em seções correspondentes das duas estruturas. Isto se dá, em virtude da diferença de características das duas estruturas, apenas de forma aproximada. Usando malhas adequadas e definindo as rigidezes de maneira apropriada consegue-se obter valores razoáveis para os deslocamentos e esforços.

De acordo com o manual de critérios de projeto da ferramenta computacional CAD/TQS®, no caso do cálculo de lajes nervuradas por analogia de grelha, cada nervura da laje corresponde a uma barra da grelha equivalente. As nervuras são calculadas com seção T. Os maciços em volta dos pilares são compostos por dois tipos de barras, com diferentes divisores de inércia a torção. A figura 8 apresenta um exemplo da geração de uma grelha equivalente para uma laje nervurada com maciço no entorno do pilar. As barras do tipo 1 reproduzem as nervuras, as de tipo 2, são da borda dos maciços e as de tipo 3, representam a parte interna do maciço (TQS INFORMÁTICA LTDA, [2002a?], p. 23, 29).

Figura 8 – Laje nervurada com maciço representada por uma grelha equivalente



(fonte: TQS INFORMÁTICA LTDA, [2002a?], p. 29)

O *software* permite a caracterização das inércias à torção e flexão de cada barra da grelha. Também permite determinar o tipo de apoio a ser desempenhado pelo pilar.

Segundo Carvalho (1994, p. 22, 33), o maior inconveniente na análise do funcionamento de uma laje, através da analogia de grelha, é a desconsideração da deformação transversal das barras, que é a principal característica das placas. Isso faz com que surjam diferenças entre os resultados de esforços e deslocamentos obtidos através da analogia de grelha e pela teoria de placa, pois essa última considera o efeito do coeficiente de Poisson do concreto, que é representado pela letra grega ν . Com intuito de contornar este inconveniente, o autor sugere correções para tornar os valores de ν coerentes.

O concreto armado pode apresentar comportamento linear e não linear, dependendo dos carregamentos aplicados. O material se comporta linearmente, dentro do estágio I, em estruturas nas quais os deslocamentos são pequenos e os esforços internos não são de grande influência. Neste estágio considera-se que o material tenha um comportamento linear na relação tensão-deformação. O fim do estágio I se dá quando ocorre a primeira fissura de tração no concreto (CARVALHO, 1994, p. 44, 52).

Carvalho (1994, p. 44, 55) comenta que, a fissuração do concreto dá início a não linearidade física do material e início ao estágio II. Segundo o autor, neste estágio, o concreto, já fissurado, pode ter sua resistência à tração desconsiderada. Para se calcular a inércia da seção fissurada, as resultantes de tensões de compressão do concreto e armadura devem ser igualadas às tensões de tração na armadura, obtendo-se uma inércia equivalente menor do que

a calculada no estágio I. O autor ainda ressalta que na avaliação das deformações finais da estrutura deve-se também levar em consideração o efeito da fluência do concreto.

A não-linearidade física nada mais é que a não proporcionalidade entre as cargas aplicadas e os deslocamentos por esta gerados. Este comportamento ocorre devido à fissuração do concreto (TQS INFORMÁTICA LTDA, [2002b?], p. 55).

4.2 CRITÉRIOS PARA O DIMENSIONAMENTO DAS LAJES

Para o dimensionamento das lajes, é de extrema importância o estudo dos critérios, isto é, os procedimentos a serem adotados, considerando-se como referência para o cálculo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Um dos principais dados a ser determinado é a carga mínima de utilização que deverá ser considerada no cálculo, definida de acordo com o destino de utilização da estrutura. A NBR 6120 define, no seu item 2.2, tal carga acidental como a carga que pode vir a atuar sobre a estrutura, em função do seu uso, ou seja, o peso de pessoas, móveis, veículos, etc. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980, p. 1). Alguns exemplos de valores mínimos definidos pela Norma são apresentados no quadro 1.

Na mesma Norma, no item 2.2.1.6, é determinado o valor do coeficiente de majoração, utilizado para o cálculo das cargas mínimas verticais de garagens e estacionamentos, caso das lajes estudadas nesse trabalho (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980, p. 4):

O valor do coeficiente ϕ de majoração das cargas acidentais a serem consideradas no projeto de garagens e estacionamentos para veículos deve ser determinado do seguinte modo: sendo l o vão de uma viga ou o vão menor de uma laje; sendo $l_0=3$ m para o caso das lajes e $l_0 = 5$ m para o caso das vigas, tem-se:

a) $\phi = 1,00$quando $l \geq l_0$;

b) $\phi = l_0/l \leq 1,43$ quando $l < l_0$.

Nota: O valor de ϕ não precisa ser considerada no cálculo das paredes e pilares.

Quadro 1 – Valores mínimos das cargas verticais

LOCAL		CARGA (kN/m ²)
Escritórios	Salas de uso geral e banheiro	2
Ginásios de esportes		5
Garagens e estacionamentos	Para veículos de passageiros ou semelhantes com carga máxima de 25 kN por veículo. Com valores de φ indicados .	3
Lojas		4
Restaurantes		3

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980, p. 3-4)

Para o dimensionamento de estruturas em concreto armado é de extrema importância que a análise de deslocamentos limite seja feita. Este valor nada mais é que o máximo deslocamento que os elementos estruturais podem sofrer, levando em consideração a deformação lenta do concreto. Os valores de deslocamento limite, utilizados na verificação do estado limite de deformação excessiva da estrutura, estão apresentados no quadro 2 e são classificados, conforme a NBR 6118, em quatro tipos de efeitos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 69):

- a) aceitabilidade sensorial: os deslocamentos causam vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável;
- b) efeitos específicos: casos nos quais o deslocamento da estrutura impede sua utilização, por exemplo, pistas de boliche;
- c) efeitos em elementos não estruturais: o deslocamento da estrutura causa mau funcionamento de elementos ligados a esta;
- d) efeitos em elementos estruturais: os deslocamentos podem afetar o comportamento do elemento estrutural, provocando afastamento das hipóteses de cálculo.

Quadro 2 – Limite para deslocamento

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$\ell / 250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$\ell / 350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$\ell / 250^{1)}$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$\ell / 350 +$ contraflecha ²⁾
			Ocorrido após a construção do piso	$\ell / 600$
Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento	
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$\ell / 500^{3)}$ ou 10 mm ou $\theta = 0,0017 \text{ rad}^{4)}$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$\ell / 250^{3)}$ ou 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação freqüente ($\psi_1=0,30$)	$H/1700$ ou $H_i/850^{5)}$ entre pavimentos ⁶⁾
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$\ell / 400^{7)}$ ou 15 mm
	Forros	Movimentos térmicos horizontais	Provocado por diferença de temperatura	$H_i/500$
		Revestimentos colados	Ocorrido após construção do forro	$\ell / 350$
		Revestimentos pendurados ou com juntas	Deslocamento ocorrido após construção do forro	$\ell / 175$
	Pontes rolantes	Desalinhamento de trilhos	Deslocamento provocado pelas ações decorrentes da frenagem	$H_i/400$
Efeitos em elementos estruturais	Afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas	Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-os ao modelo estrutural adotado.		

¹⁾ As superfícies devem ser suficientemente inclinadas ou o deslocamento previsto compensado por contraflechas, de modo a não se ter acúmulo de água.

²⁾ Os deslocamentos podem ser parcialmente compensados pela especificação de contraflechas. Entretanto, a atuação isolada da contraflecha não pode ocasionar um desvio do plano maior que $\ell / 350$.

³⁾ O vão ℓ deve ser tomado na direção na qual a parede ou a divisória se desenvolve.

⁴⁾ Rotação nos elementos que suportam paredes.

⁵⁾ H é a altura total do edifício e H_i o desnível entre dois pavimentos vizinhos.

⁶⁾ Esse limite aplica-se ao deslocamento lateral entre dois pavimentos consecutivos devido à atuação de ações horizontais. Não devem ser incluídos os deslocamentos devidos a deformações axiais nos pilares. O limite também se aplica para o deslocamento vertical relativo das extremidades de lintéis conectados a duas paredes de contraventamento, quando H_i representa o comprimento do lintel.

⁷⁾ O valor ℓ refere-se à distância entre o pilar externo e o primeiro pilar interno.

NOTAS

1 Todos os valores limites de deslocamentos supõem elementos de vão ℓ suportados em ambas as extremidades por apoios que não se movem. Quando se tratar de balanços, o vão equivalente a ser considerado deve ser o dobro do comprimento do balanço.

2 Para o caso de elementos de superfície, os limites prescritos consideram que o valor ℓ é o menor vão, exceto em casos de verificação de paredes e divisórias, onde interessa a direção na qual a parede ou divisória se desenvolve, limitando-se esse valor a duas vezes o vão menor.

3 O deslocamento total deve ser obtido a partir da combinação das ações características ponderadas pelos coeficientes definidos na seção 11.

4 Deslocamentos excessivos podem ser parcialmente compensados por contraflechas.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 70)

Outros critérios utilizados para o dimensionamento das lajes, obtidos através da mesma Norma, são apresentados a seguir, separado-se os para lajes nervuradas e para as lajes cogumelo, sendo nesse último apresentadas as armaduras de punção e contra colapso progressivo.

4.2.1 Critérios para lajes nervuradas

De acordo com a NBR 6118, nos itens 13.2.4.2, 14.7.7 e 20.1, as lajes nervuradas bidirecionais podem ser calculadas como lajes maciças, desde que sejam obedecidas as seguintes condições (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 67, 86, 153):

- a) o espaçamento entre eixos de nervuras deve ser menor que 110 cm;
- b) a largura das nervuras deve ser superior a 5 cm, sendo que, nervuras contendo armadura de compressão devem ter espessura mínima de 8 cm;
- c) a espessura da mesa, quando não houver tubulações horizontais embutidas, deve ser maior que 3 cm ou igual a $1/15$ da distância entre nervuras. Nos casos nos quais existirem tais tubulações, com diâmetros não maiores do que 12,5 mm, a espessura mínima admitida para a mesa passa a ser 4 cm;
- d) a verificação da flexão da mesa pode ser dispensada para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menores ou iguais a 65 cm, podendo-se adotar armadura mínima para a mesa, sem dimensionamento. Nas lajes nos quais esse valor é ultrapassado, mas não maior que 110 cm, exige-se a verificação da flexão da mesa;
- e) a verificação ao cisalhamento das nervuras, quando a distância entre eixos das nervuras for menor que 65 cm, pode ser feita considerando os critério utilizados nas lajes. A mesma verificação é permitida quando os eixos de nervuras forem espaçados de até 90 cm e a largura média das nervuras for maior que 12 cm. Quando a distância entre eixos for maior que 65 cm e menor que 110 cm, tal verificação deve ser feita como vigas, tornando o uso obrigatório de estribos;
- f) os estribos em lajes nervuradas, quando necessários, não devem ter espaçamento superior a 20 cm.

Conforme a mesma Norma, quando tais condições não forem verificadas, a laje nervurada deve ser projetada considerando a capa como laje maciça apoiada na grelha de vigas.

4.2.2 Critérios para lajes cogumelo

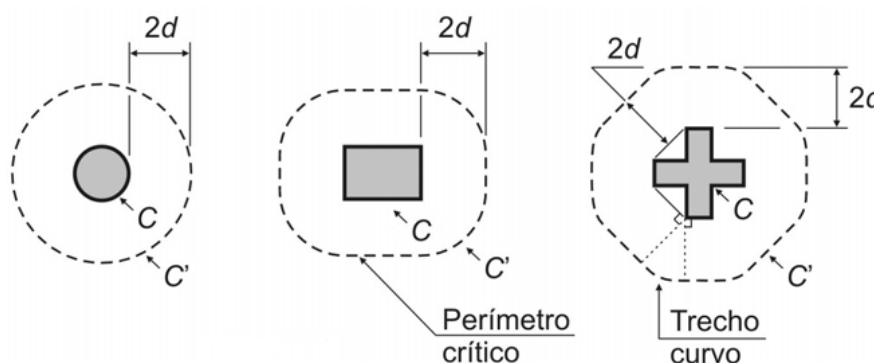
Em relação ao cálculo de lajes cogumelo a NBR 6118, no seu item 14.7.8, indica que (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 86):

A análise estrutural de lajes lisas e cogumelo deve ser realizada mediante emprego de procedimento numérico adequado, por exemplo, diferenças finitas, elementos finitos e elementos de contorno.

Nos casos em que os pilares estiverem dispostos em filas ortogonais, de maneira regular e com vãos pouco diferentes, o cálculo dos esforços pode ser realizado pelo processo elástico aproximado, com redistribuição, que consiste em adotar em cada direção pórticos múltiplos, para obtenção dos esforços solicitantes.

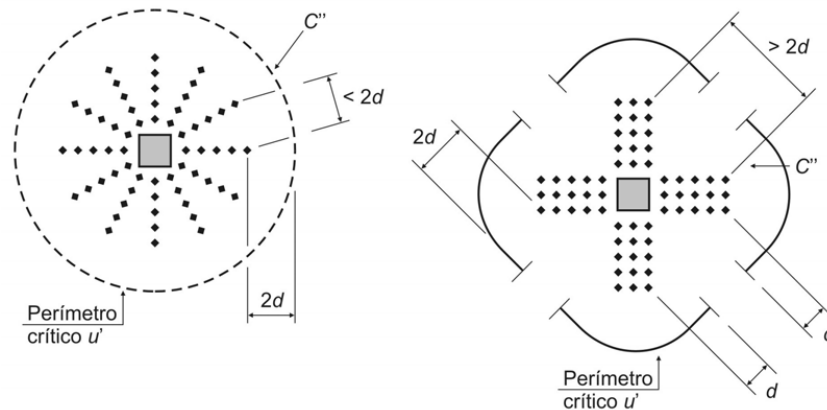
De acordo com a NBR 6118, a verificação da necessidade de armaduras de punção para pilares internos com carregamentos simétricos deve ser feita primeiramente verificando a compressão diagonal do concreto na superfície crítica C , representadas na figura 9, que corresponde ao contorno do pilar, através da tensão de cisalhamento. Na superfície crítica, C' , afastada de duas vezes a espessura da laje da face do pilar (figura 9), deve ser verificada a capacidade de ligação à punção, associada à resistência à tração diagonal do concreto. Nos casos nos quais a tensão aplicada for maior do que a resistente, o entorno do pilar deve ser armado à punção. Em tais situações, deve ser feita uma terceira verificação da resistência ao cisalhamento do concreto, em um contorno C'' , afastado de duas vezes do último contorno de armadura, conforme ilustrado na figura 10 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 145, 151).

Figura 9 – Perímetros críticos em pilares internos



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 145)

Figura 10 – Disposição da armadura de punção e delimitação da superfície crítica C''



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 151)

A NBR 6118, no seu item 20.4, sobre as armaduras de punção indica que (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 155):

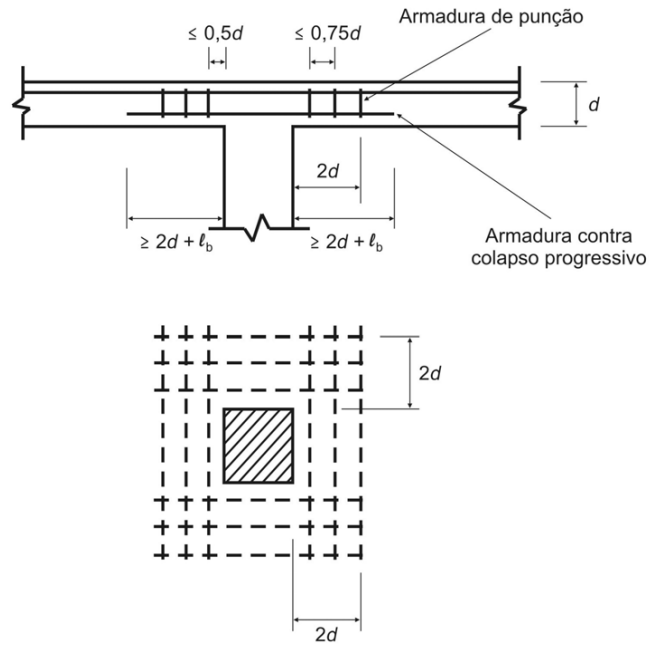
Quando necessárias, as armaduras para resistir à punção devem ser constituídas por estribos verticais ou conectores (studs), com preferência pela utilização destes últimos.

O diâmetro da armadura de estribos não pode superar $h/20$ e deve haver contato mecânico das barras longitudinais com os cantos dos estribos (ancoragem mecânica).

As regiões mínimas em que devem ser dispostas as armaduras de punção, bem como as distâncias regulamentares a serem obedecidas estão mostradas na figura [...] [11].

A NBR 6118, no seu item 19.5.4, comenta que a armadura contra colapso progressivo tem como objetivo garantir a ductilidade local e a conseqüente proteção contra a ruptura frágil da estrutura (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 151).

Figura 11 – Armaduras de punção e contra colapso progressivo



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 156)

5 CÁLCULO DAS LAJES NERVURADAS

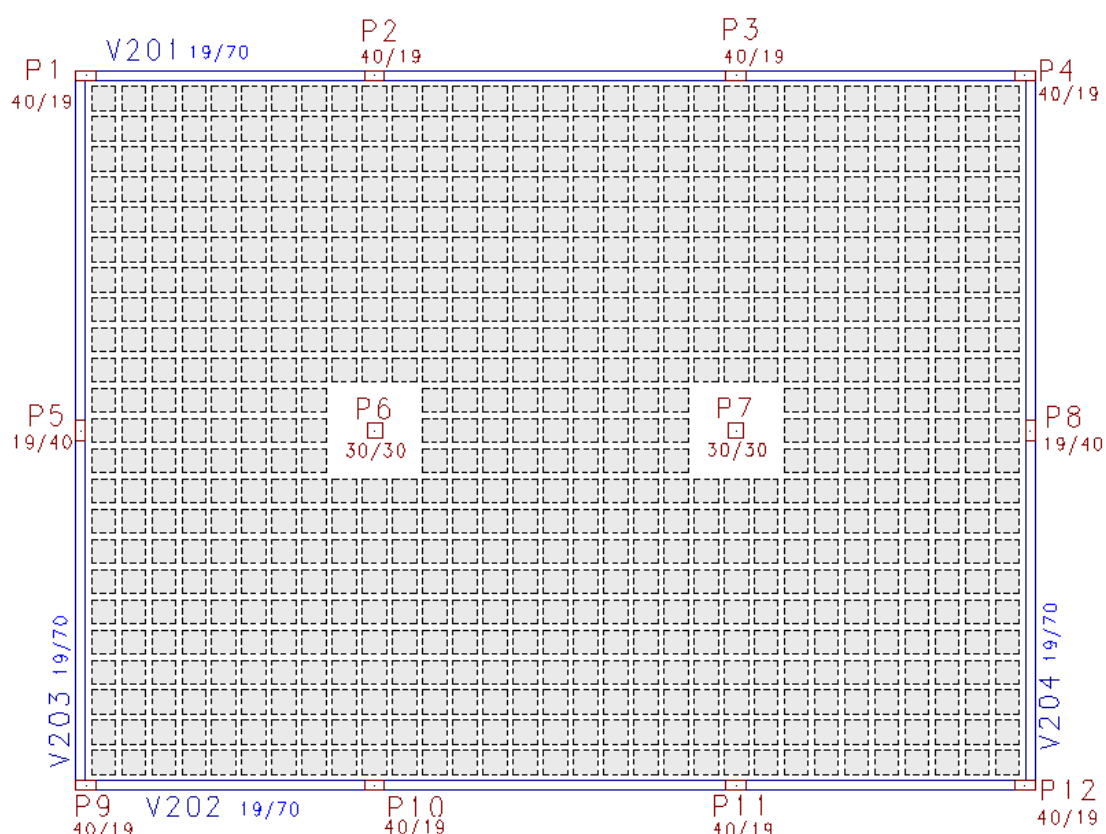
Este capítulo apresenta o dimensionamento das lajes em estudo e os resultados obtidos com este, a partir da determinação das configurações estruturais propostas. O cálculo, através da analogia de grelha, foi desenvolvido utilizando-se a ferramenta computacional CAD/TQS®.

Para o cálculo das lajes nervuradas simples e duplas, foram adotadas algumas considerações:

- a) resistência à compressão do concreto de 30 MPa;
- b) carga acidental de 3 kN/m² (referente a pavimentos destinados a garagens e estacionamentos);
- c) deslocamento máximo admissível de $\ell/350$, sendo ℓ o maior vão da laje, em centímetros;
- d) coeficiente de deformação lenta de 2,5.

As lajes foram configuradas e calculadas de modo a apresentarem o menor dispêndio com materiais possível. Primeiramente foi determinada a utilização de uma laje retangular, com configuração apresentada na figura 12, com vigas de borda de 19 cm de largura por 70 cm de altura, pilares de 40 cm por 19 cm nos cantos e no entorno da laje e pilares centrais de 30 cm por 30 cm, apoiados em regiões maciças de concreto, quadradas, de mesma espessura que a laje, com variadas dimensões em função das dimensões em planta da laje.

Figura 12 – Dimensões de vigas e pilares das lajes nervuradas em estudo

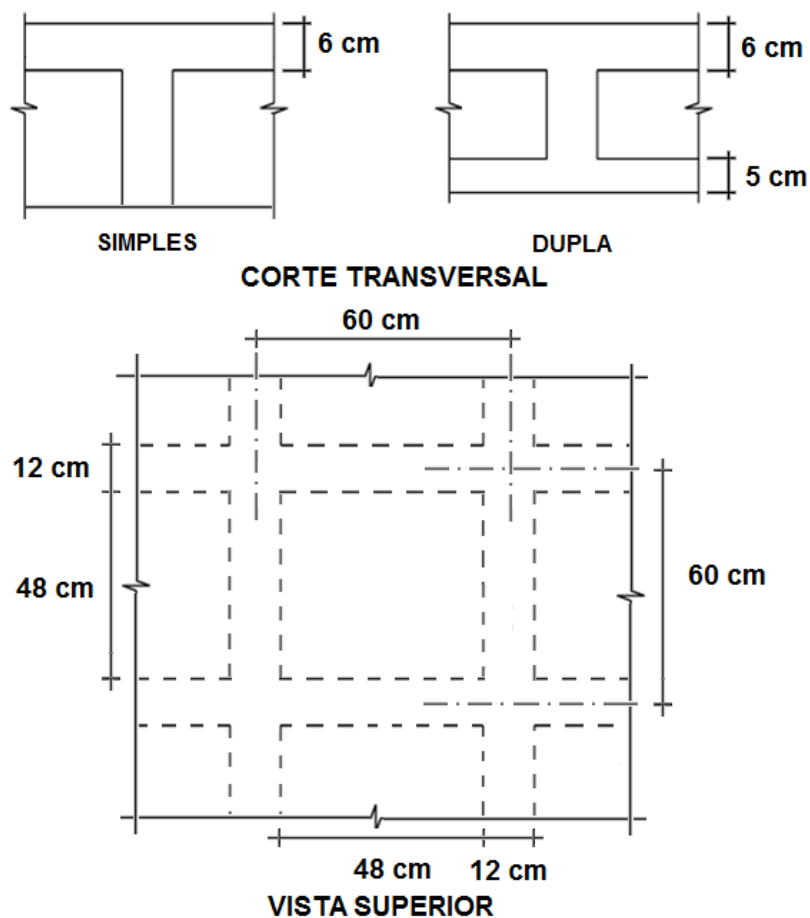


(fonte: elaborado pelo CAD/TQS®)

Para todas as lajes nervuradas, a distância de eixo à eixo das nervuras foi fixada em 60 cm e a largura das nervuras em 12 cm. Em todas as lajes nervuradas simples, foram utilizados 6 cm de espessura para a capa de concreto. Nas lajes nervuradas duplas, a capa superior foi fixada em 6 cm e a inferior em 5 cm.

A figura 13 ilustra as dimensões fixas das lajes nervuradas em estudo. O corte transversal das lajes indica as espessuras das capas de concreto para as lajes nervuradas simples e duplas. A vista superior da laje é igual para os dois tipos de laje nervurada. Tais dimensões foram adotadas respeitando a NBR 6118/2007 que indica que, nos casos nos quais existam tubulações horizontais embutidas, com diâmetros não maiores do que 12,5 mm, a espessura mínima admitida para a mesa é de 4 cm.

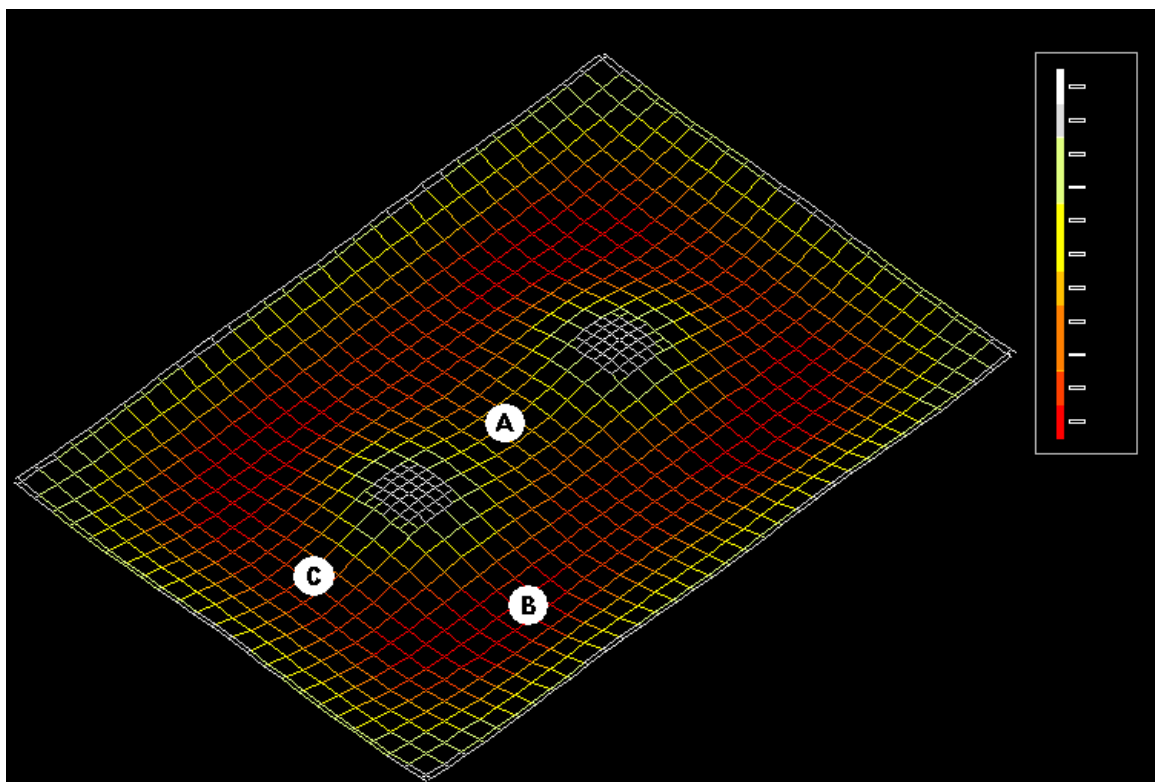
Figura 13 – Dimensões das nervuras e capas de concreto das lajes nervuradas em estudo



(fonte: elaborado pela autora)

Através do *software* CAD/TQS®, foram estudadas diversas relações entre as dimensões em planta da laje, a fim de que os valores dos deslocamentos máximos dos diferentes vãos fossem o mais próximo possível. Observa-se na figura 14 que, para esta relação escolhida entre vãos, a laje em questão apresenta deslocamentos similares nos três pontos indicados, A, B e C. Na escala de cores, a cor vermelha representa os maiores deslocamentos da estrutura.

Figura 14 – Exemplo de deslocamento da estrutura

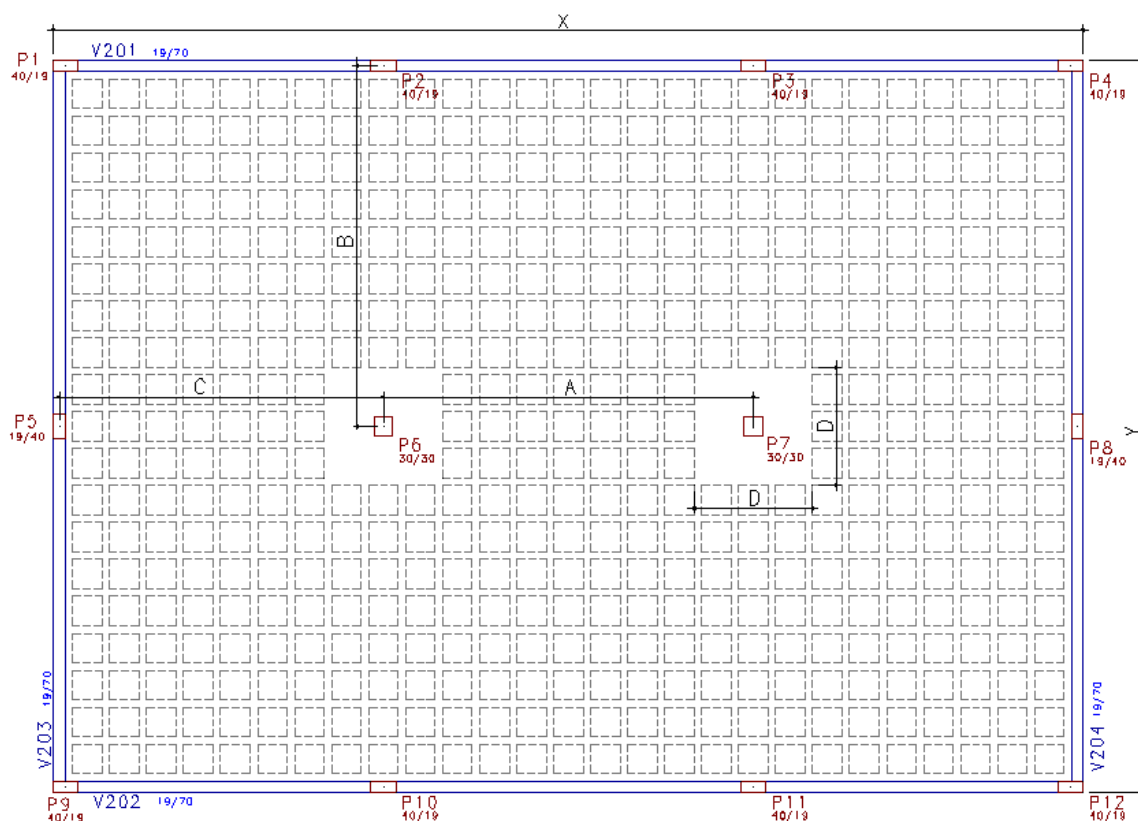


(fonte: elaborado pelo CAD/TQS®)

Na figura 15, está representada uma planta baixa genérica das lajes lisas nervuradas utilizadas neste trabalho. Nesta estão cotadas as medidas que estão sendo variadas, sendo A, a distância entre pilares internos, o maior vão de cada laje. As medidas de B e C são os vãos entre os eixos dos pilares contrários ao eixo das vigas de borda. A distância D representa a região maciça da laje no entorno dos pilares, sempre com formato em planta quadrado. As medidas X e Y, são as dimensões, horizontais e verticais respectivamente, totais das lajes.

A primeira laje calculada neste trabalho, L1, tem vãos A, B e C medidos de eixo à eixo de apoio, respectivamente de 600 cm, 585,5 cm e 525,5 cm. Esta foi a menor laje que se pode calcular com tal configuração que a diferença entre laje nervurada simples e dupla, fosse visível. Para dimensões menores, a laje nervurada dupla teria espessura menor que 15 cm, sendo 11 cm de capa de concreto, com isso, o bloco de EPS teria 4 cm, o que seria praticamente uma laje maciça.

Figura 15 – Dimensões variadas nas lajes nervuradas em estudo



(fonte: elaborado pelo CAD/TQS®)

O limitador da maior laje calculada neste trabalho, a L8, é a armadura contra colapso progressivo, que deve ser colocada sobre os pilares de apoio. Esta armadura é calculada em função da área do pilar e a carga suportada por este.

As lajes seguintes foram dimensionadas com incrementos de 60 cm nos vãos das lajes, mantendo assim a relação entre vãos estabelecida anteriormente. No quadro 3, estão relacionadas as lajes utilizadas neste trabalho, com suas respectivas dimensões em planta e seus diferentes tamanhos de maciços.

Quadro 3 – Dimensões em planta das lajes nervuradas em estudo

LAJE	DIMENSÕES (cm)					
	A	B	C	D	X	Y
L1	600	585.5	525.5	192	1670	1190
L2	660	645.5	585.5	192	1850	1310
L3	720	705.5	645.5	192	2030	1430
L4	780	765.5	705.5	192	2110	1550
L5	840	825.5	765.5	192	2390	1670
L6	900	885.5	825.5	312	2590	1790
L7	960	945.5	885.5	312	2750	1910
L8	1020	1005.5	945.5	432	2930	2030

(fonte: elaborado pela autora)

Com as dimensões em planta das lajes definidas, arbitrou-se uma espessura inicial para cada laje. A aplicação do carregamento pré-estabelecido resultou em determinado deslocamento máximo. Caso o deslocamento obtido com esta espessura de laje fosse muito diferente do deslocamento ao longo do tempo máximo permitido para a laje em questão, definia-se uma nova espessura, até que o valor deste deslocamento fosse próximo e inferior ao valor limite estipulado pela NBR 6118/2007.

Como o deslocamento máximo da laje depende apenas do seu maior vão, cada laje em estudo tem seu respectivo valor limite, independentemente de ser nervurada dupla ou simples. No quadro 4, são apresentados os oito tamanhos de lajes calculadas, com seus respectivos deslocamentos máximos e espessuras de laje, quando calculadas com a solução nervurada simples e dupla. Percebe-se que as lajes nervuradas duplas necessitam menores espessuras que as nervuradas simples, para o mesmo vão e com o mesmo deslocamento máximo.

Quadro 4 – Deslocamentos e espessuras das lajes nervuradas em estudo

LAJE	DESLOC. MÁX. PERMITIDO (cm)	TIPO	DESLOCAMENTO (cm)	ESPESSURA (cm)
L1	1.71	SIMPLES	1.71	21
		DUPLA	1.68	18
L2	1.88	SIMPLES	1.78	24
		DUPLA	1.89	20
L3	2.05	SIMPLES	1.95	27
		DUPLA	1.89	23
L4	2.22	SIMPLES	2.11	30
		DUPLA	2.13	25
L5	2.4	SIMPLES	2.34	33
		DUPLA	2.42	27
L6	2.57	SIMPLES	2.45	36
		DUPLA	2.5	30
L7	2.74	SIMPLES	2.71	39
		DUPLA	2.69	33
L8	2.91	SIMPLES	2.81	43
		DUPLA	2.89	36

(fonte: elaborado pela autora)

5.1 QUANTITATIVOS DE MATERIAIS

Com as dimensões das lajes estabelecidas, puderam-se calcular os quantitativos de concreto e fôrmas para cada laje, na solução simples e dupla. O quadro 5 apresenta os volumes de concreto e EPS, em metros cúbicos, e a área de fôrmas das lajes, em metros quadrados.

A área de fôrmas a serem colocados na base das lajes é igual para os dois tipos de laje, simples e duplas, pois depende apenas da área em planta desta. O material de enchimento utilizado nas lajes nervuradas é o poliestireno expandido, também conhecido por EPS. Para o mesmo tamanho de laje, os dois tipos de laje nervurada apresentam o mesmo número de blocos. Estes blocos, para todos tamanho e tipos de lajes, têm dimensões em planta de 48 cm por 48 cm, porém, as espessuras destes são diferentes para as lajes nervuradas simples e duplas, variando em consequência seus respectivos volumes.

Quadro 5 – Quantitativos de concreto, EPS e fôrmas

LAJE	TIPO	VOLUME DE CONCRETO (m ³)	VOLUME DE EPS (m ³)	ÁREA DE FÔRMAS (m ²)
L1	SIMPLES	22.34	17.1	187.83
	DUPLA	25.83	7.98	
L2	SIMPLES	29.89	25.38	230.31
	DUPLA	33.37	12.69	
L3	SIMPLES	38.97	35.85	277.11
	DUPLA	43.25	20.49	
L4	SIMPLES	49.7	48.77	328.23
	DUPLA	53.61	28.45	
L5	SIMPLES	62.22	64.39	383.67
	DUPLA	65.44	38.15	
L6	SIMPLES	78.9	80.73	443.43
	DUPLA	81.9	51.13	
L7	SIMPLES	95.66	102.26	507.51
	DUPLA	99.3	68.17	
L8	SIMPLES	120.96	126.68	575.91
	DUPLA	121.73	85.59	

(fonte: elaborado pela autora)

Após a determinação das dimensões das lajes a serem analisadas neste trabalho, foi feito o cálculo destas através do *software* CAD/TQS®. Primeiramente foi feito o lançamento estrutural das lajes, vigas e pilares e inserida a carga distribuída de 300 kg/m² atuante na laje. Com isso, foi gerada a grelha análoga para cada laje. Cada barra da grelha representa uma nervura da laje. Os maciços, por serem regiões de grande rigidez, são representados por dois tipos de barras, com diferentes divisores de inércia.

A laje nervurada simples, apresenta a mesma distribuição de barras na grelha análoga que a laje nervurada dupla, o que diferencia as duas grelhas é o divisor de inércia de cada barra. Na laje nervurada simples a inércia da barra corresponde a uma seção T e na dupla corresponde a uma seção I.

Em seguida foi feito o cálculo dos esforços. Cada barra da grelha recebe um momento fletor máximo. Com este esforço e com a seção transversal da nervura é calculada a área de aço necessária para aquela nervura. É necessário fazer a unificação das armaduras, com intuito de homogeneizar a armadura da laje, facilitando sua execução.

São também calculadas as armaduras transversais, que são os estribos e os *studs*. Tais armaduras são necessárias para resistir aos esforços cortantes e de punção, geralmente altos nas regiões próximas aos apoios. Nota-se que, nas lajes em estudo, a distância entre eixo das nervuras é menor que 65 cm e a espessura das nervuras é de 12 cm, com isso, a verificação ao cisalhamento das nervuras pôde ser feita considerando os critérios utilizados nas lajes, ou seja, os estribos foram colocados apenas nas regiões necessárias.

Nas lajes nervuradas em estudo, o espaçamento entre eixos de nervuras é menor que 65 cm, com isso, não é necessária a verificação da flexão da mesa, podendo-se adotar armadura mínima para esta, dispensando o dimensionamento. Para isto, é utilizada uma tela soldada com barras de 4,3 mm espaçadas de 15 cm em ambos os sentidos, posicionada na parte inferior da capa superior da laje. Tal armadura é necessária e igual para os dois tipos de lajes nervuradas, pois depende somente da área da laje.

O quadro 6 apresenta os resultados dos quantitativos de aço, em quilos, para cada laje. Tais valores estão divididos em armadura superior, inferior, transversal e armadura inferior da capa superior da laje.

Quadro 6 – Quantitativo de aço

LAJE	TIPO	ARMADURA INFERIOR (kg)	ARMADURA SUPERIOR (kg)	ARMADURA TRANSVERSAL (kg)	ARMADURA INFERIOR DA CAPA (kg)	TOTAL DE AÇO (kg)
L1	SIMPLES	757	495	62	305.8	1619.8
	DUPLA	1108	410	56		1879.8
L2	SIMPLES	1003	677	16	374.9	2070.9
	DUPLA	1461	589	62		2486.9
L3	SIMPLES	1325	823	44	451.1	2643.1
	DUPLA	1823	827	66		3167.1
L4	SIMPLES	1748	1264	56	534.4	3602.4
	DUPLA	2451	1116	89		4190.4
L5	SIMPLES	2198	1655	70	624.6	4547.6
	DUPLA	3121	1533	138		5416.6
L6	SIMPLES	2871	2418	81	721.9	6091.9
	DUPLA	3940	1816	129		6606.9
L7	SIMPLES	3565	2658	132	826.2	7181.2
	DUPLA	4898	2231	202		8157.2
L8	SIMPLES	4383	3320	169	937.6	8809.6
	DUPLA	5998	2967	213		10115.6

(fonte: elaborado pela autora)

5.2 CUSTOS COM MATERIAIS

Com os quantitativos de concreto, aço e fôrmas, e seus respectivos preços, obtidos junto a uma construtora de médio porte localizada na cidade de Porto Alegre, pôde-se calcular os custos com materiais das lajes, apresentados no quadro 7. Ressalta-se que o objetivo principal deste trabalho não é a determinação exata do custo das lajes e sim a comparação dos custos com materiais das lajes nervuradas simples e duplas.

O preço do concreto utilizado é referente ao concreto usinado e inclui o preço do aluguel da bomba. O concreto especificado é 30 MPa de resistência à compressão e seu preço é de R\$ 268,00/m³.

O sistema de fôrmas adotado para as lajes nervuradas em estudo é igual para as soluções simples e duplas e é composto por chapas de compensado, blocos de EPS e o sistema de escoramento metálico alugado. As chapas de compensados plastificados de espessura de 14 mm são utilizadas para fazer a base da laje, podendo ser reutilizadas nos próximos andares, quando existentes. O preço do compensado utilizado neste trabalho é de R\$ 13,38/m². O custo com compensado é igual para as lajes nervuradas simples e duplas, pois, depende somente da área da laje.

Os blocos de poliestireno expandido, EPS, são utilizados como material de enchimento para dar o formato da laje nervurada, porém, são fôrmas perdidas, visto que, depois que a laje está pronta, os blocos não são retirados. O preço destes blocos, já cortados, é de R\$ 98,00/m³.

O número de escoras metálicas necessárias depende do peso da laje e de cargas acidentais a serem consideradas. Porém, a diferença do peso por metro quadrado, entre as lajes nervuradas simples e duplas é baixa em relação à carga suportada pelo sistema de escoramento. Com isso, neste trabalho, é considerado que o escoramento das lajes nervuradas simples e duplas é igual e que depende somente da área da laje. O preço do aluguel do sistema de escoramento, calculado aproximadamente, incluindo todos os elementos deste, é de R\$ 14,00/m² por mês.

O preço do quilo do aço foi considerado de forma aproximada, utilizando-se uma média ponderada entre os preços das diversas bitolas utilizadas e incluindo os serviços de corte e dobra, totalizando o preço de R\$ 2,64/kg.

Quadro 7 – Custos com materiais

LAJE	TIPO	CONCRETO R\$268,00/m ³	COMPEN- SADO R\$13,38/m ²	EPS R\$98,00/m ³	ESCORA- MENTO R\$14,00/m ²	AÇO R\$2,63/kg	TOTAL (R\$)
L1	SIMPLES	5987.12	2513.17	1675.8	2629.62	4260.04	17065.75
	DUPLA	6922.44		782.04		4943.84	17791.11
L2	SIMPLES	8010.52	3081.55	2487.24	3224.34	5446.58	22250.23
	DUPLA	8943.16		1243.62		6540.66	23033.33
L3	SIMPLES	10443.96	3707.73	3513.3	3879.54	6951.45	28495.98
	DUPLA	11591		2008.02		8329.57	29515.86
L4	SIMPLES	13319.6	4391.72	4779.46	4595.22	9474.20	36560.20
	DUPLA	14367.48		2788.1		11020.64	37163.16
L5	SIMPLES	16674.96	5133.50	6310.22	5371.38	11960.23	45450.29
	DUPLA	17537.92		3738.7		14245.70	46027.20
L6	SIMPLES	21145.2	5933.09	7911.54	6208.02	16021.71	57219.56
	DUPLA	21949.2		5010.74		17376.16	56477.21
L7	SIMPLES	25636.88	6790.48	10021.48	7105.14	18886.63	68440.61
	DUPLA	26612.4		6680.66		21453.51	68642.19
L8	SIMPLES	32417.28	7705.68	12414.64	8062.74	23169.20	83769.54
	DUPLA	32623.64		8387.82		26603.98	83383.86

(fonte: elaborado pela autora)

6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a comparação dos resultados obtidos e diferenças entre as lajes nervuradas duplas e simples, em função da espessura das lajes, do volume de concreto e EPS, do peso de aço, das taxas de armadura e custos com materiais. Nota-se que as comparações sempre são feitas comparando a laje nervurada dupla em relação à simples.

6.1 COMPARAÇÃO DAS ESPESURAS DAS LAJES

Após o cálculo dos diversos tamanhos de laje propostas, para as soluções simples e duplas, obteve-se o resultado das espessuras das lajes. No quadro 8, tem-se, para os oito tamanhos de lajes estudadas, as respectivas espessuras quando dimensionadas com laje nervurada simples e dupla. O mesmo quadro apresenta a diferença de espessura em centímetro entre os dois tipos de laje nervurada. A última coluna deste quadro apresenta a diferença de espessuras expressa em percentual, ou seja, quanto por cento a menos de espessura a laje nervurada dupla tem em relação à simples, para a mesma configuração estrutural.

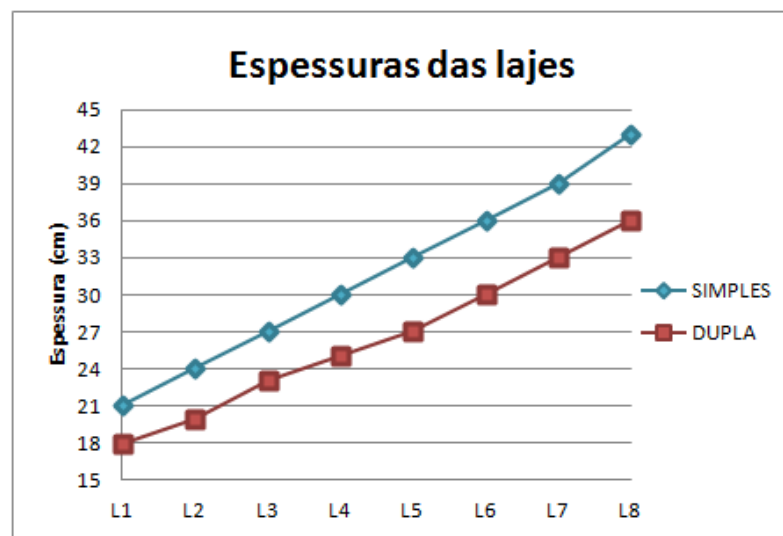
Quadro 8 – Comparação das espessuras das lajes

LAJE	TIPO	ESPESSURA (cm)	DIFERENÇA DE ESPESSURA (cm)	DIFERENÇA DE ESPESSURA (%)
L1	SIMPLES	21	3	-14.3%
	DUPLA	18		
L2	SIMPLES	24	4	-16.7%
	DUPLA	20		
L3	SIMPLES	27	4	-14.8%
	DUPLA	23		
L4	SIMPLES	30	5	-16.7%
	DUPLA	25		
L5	SIMPLES	33	6	-18.2%
	DUPLA	27		
L6	SIMPLES	36	6	-16.7%
	DUPLA	30		
L7	SIMPLES	39	6	-15.4%
	DUPLA	33		
L8	SIMPLES	43	7	-16.3%
	DUPLA	36		

(fonte: elaborado pela autora)

A figura 16 apresenta o gráfico das espessuras das lajes nervuradas simples e duplas, sendo seu eixo horizontal as diferentes lajes propostas, em ordem crescente de dimensões em plantas, e no eixo vertical a espessura da laje em centímetros. Percebe-se que as espessuras aumentam proporcionalmente com o aumento dos vãos das lajes e que as lajes nervuradas duplas, para todas as situações aqui estudadas, apresentam menores espessuras que as lajes nervuradas simples, para as mesmas dimensões de laje e mesmos deslocamentos máximos permitidos.

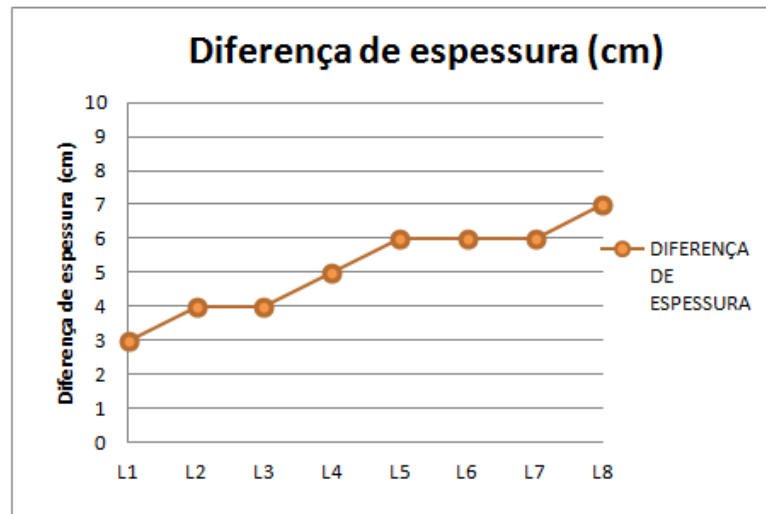
Figura 16 – Espessuras das lajes em centímetros



(fonte: elaborado pela autora)

A figura 17 ilustra o gráfico da diferença de espessuras em centímetros entre as duas soluções de laje nervurada. Percebe-se que a diferença de espessuras, em centímetros, aumenta com o aumento das dimensões em planta das lajes, ou seja, quanto maior o vão a ser vencido pela laje, maior a redução de espessura apresentada pela laje nervurada dupla em relação à simples.

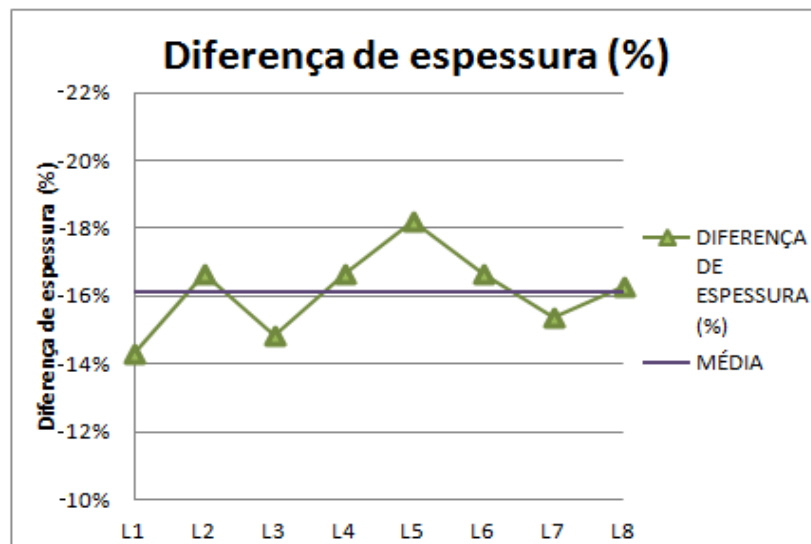
Figura 17 – Diferença de espessura em centímetros



(fonte: elaborado pela autora)

Na figura 18, é apresentada a diferença de espessura em percentual. Nota-se que tal diferença não estabelece uma relação linear com o aumento de dimensões das lajes, mas, em média, a redução de espessura da laje, quando utilizada a laje nervurada dupla em relação à simples, é de 16%.

Figura 18 – Diferença de espessura em percentual



(fonte: elaborado pela autora)

6.2 COMPARAÇÃO DOS VOLUMES DE CONCRETO

O quadro 9 apresenta os volumes de concreto, expressos em metros cúbico, necessário para a execução das lajes analisadas neste trabalho. No mesmo quadro, são apresentadas as diferenças de volume de concreto, expressas em percentual, ou seja, quanto por cento a mais de metros cúbicos de concreto as lajes nervuradas duplas necessitam em relação às lajes nervuradas simples.

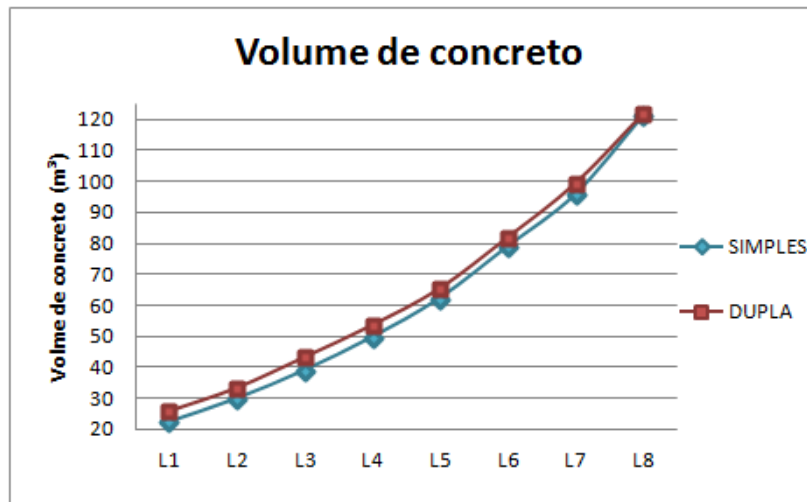
Quadro 9 – Comparação dos volumes de concreto

LAJE	TIPO	VOLUME DE CONCRETO (m ³)	DIFERENÇA VOLUME CONCRETO (%)
L1	SIMPLES	22,34	15,6%
	DUPLA	25,83	
L2	SIMPLES	29,89	11,6%
	DUPLA	33,37	
L3	SIMPLES	38,97	11,0%
	DUPLA	43,25	
L4	SIMPLES	49,7	7,9%
	DUPLA	53,61	
L5	SIMPLES	62,22	5,2%
	DUPLA	65,44	
L6	SIMPLES	78,9	3,8%
	DUPLA	81,9	
L7	SIMPLES	95,66	3,8%
	DUPLA	99,3	
L8	SIMPLES	120,96	0,6%
	DUPLA	121,73	

(fonte: elaborado pela autora)

A figura 19 apresenta os volumes de concreto das lajes nervuradas simples e duplas em análise, em forma de gráfico. Nota-se que o volume de concreto aumenta proporcionalmente com o aumento do tamanho de lajes em planta.

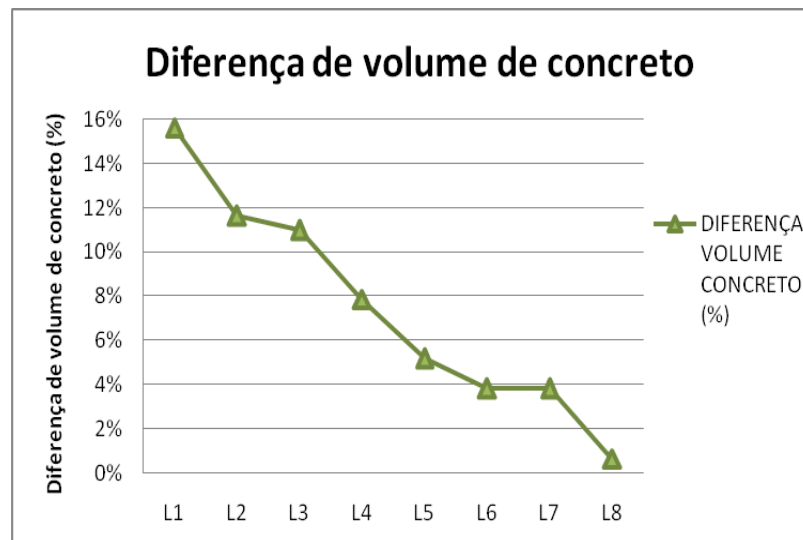
Figura 19 – Volume de concreto em metros cúbicos



(fonte: elaborado pela autora)

Na figura 20, está representada em forma de gráfico a diferença em percentual do volume de concreto, entre as lajes nervuradas simples e duplas. Nota-se que a diferença de volume de concreto vai sendo amortizada com o aumento das dimensões das lajes, sendo esta diferença na L8, a maior laje em estudo, praticamente nula.

Figura 20 – Diferença de volume de concreto em percentual



(fonte: elaborado pela autora)

6.3 COMPARAÇÃO DOS VOLUMES DE EPS

No quadro 10, a comparação do volume de EPS necessários para a construção das lajes nervuradas simples e duplas é apresentada. Neste quadro, está representada a diferença em percentual do volume de EPS entre as lajes nervuradas simples e as duplas, ou seja, quanto por cento a menos de volume de EPS, a laje nervurada dupla necessita em relação à simples.

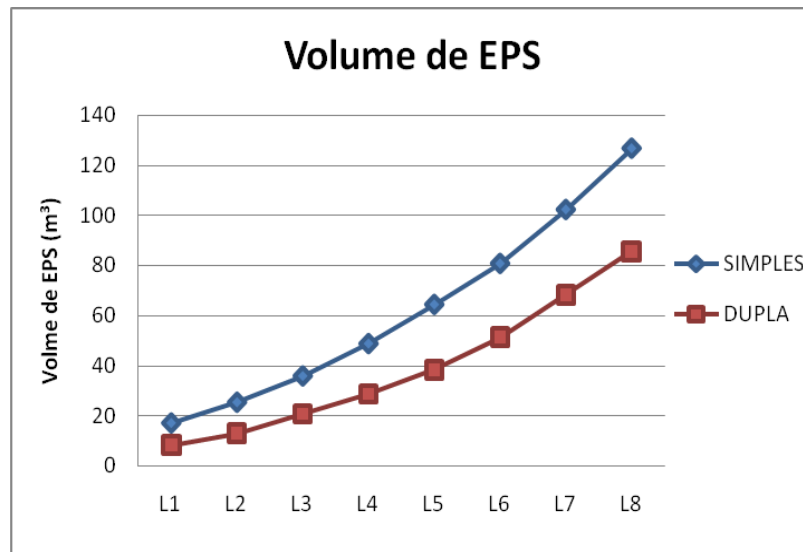
Quadro 10 – Comparação dos volumes de EPS

LAJE	TIPO	VOLUME DE EPS (m ³)	DIFERENÇA VOLUME DE EPS (%)
L1	SIMPLES	17,1	-53,3%
	DUPLA	7,98	
L2	SIMPLES	25,38	-50,0%
	DUPLA	12,69	
L3	SIMPLES	35,85	-42,8%
	DUPLA	20,49	
L4	SIMPLES	48,77	-41,7%
	DUPLA	28,45	
L5	SIMPLES	64,39	-40,8%
	DUPLA	38,15	
L6	SIMPLES	80,73	-36,7%
	DUPLA	51,13	
L7	SIMPLES	102,26	-33,3%
	DUPLA	68,17	
L8	SIMPLES	126,68	-32,4%
	DUPLA	85,59	

(fonte: elaborado pela autora)

A figura 21 apresenta, em forma de gráfico, os diferentes volumes de EPS necessários para cada laje nervurada estudada nos dois tipos de laje nervurada proposta. Nota-se que o volume de EPS, aumenta proporcionalmente com o aumento das dimensões das lajes, pois está diretamente ligada com o aumento das espessuras.

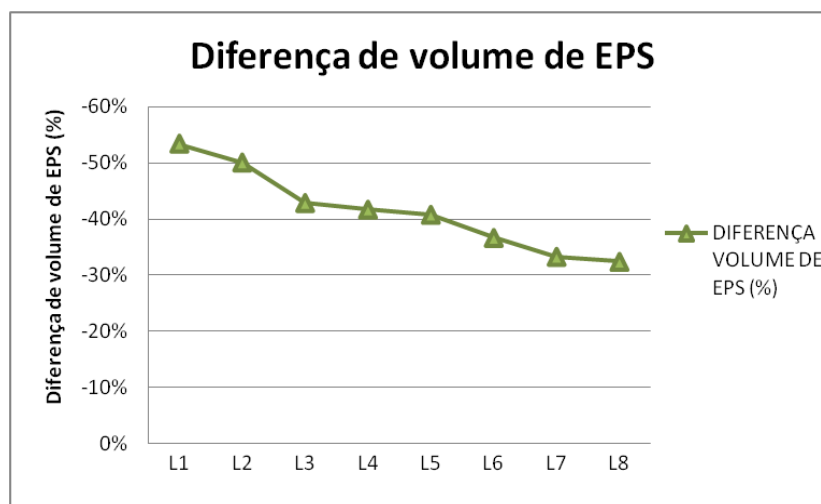
Figura 21 – Volume de EPS em metros cúbicos



(fonte: elaborado pela autora)

A figura 22 apresenta a diferença de volume de EPS em percentual das lajes nervuradas simples e duplas. Nota-se que a diferença de volume de EPS diminui com o aumento das dimensões das lajes. Porém, mesmo para a maior configuração em estudo, a redução do volume de EPS, quando utilizada a laje nervurada dupla, é de 32%.

Figura 22 – Diferença de volume de EPS em percentual



(fonte: elaborado pela autora)

6.4 COMPARAÇÃO DOS PESOS DE AÇO

No quadro 11, estão representados os pesos totais de aço necessários para a construção das lajes em estudo. Este peso total de aço inclui armadura superior, inferior, transversal e inferior da capa superior. O mesmo quadro apresenta a diferença de peso de aço entre as lajes nervuradas simples e duplas, expressa em percentual. Desta diferença, pode-se analisar o quanto por cento a mais as lajes nervuradas duplas necessitam de aço em relação às simples.

Quadro 11 – Comparação dos pesos de aço

LAJE	TIPO	TOTAL DE AÇO (kg)	DIFERENÇA DE PESO DE AÇO (%)
L1	SIMPLES	1619,8	16,1%
	DUPLA	1879,8	
L2	SIMPLES	2070,9	20,1%
	DUPLA	2486,9	
L3	SIMPLES	2643,1	19,8%
	DUPLA	3167,1	
L4	SIMPLES	3602,4	16,3%
	DUPLA	4190,4	
L5	SIMPLES	4547,6	19,1%
	DUPLA	5416,6	
L6	SIMPLES	6091,9	8,5%
	DUPLA	6606,9	
L7	SIMPLES	7181,2	13,6%
	DUPLA	8157,2	
L8	SIMPLES	8809,6	14,8%
	DUPLA	10115,6	

(fonte: elaborado pela autora)

A figura 23 apresenta as quantidades de aço necessárias para as diferentes lajes analisadas em formato de gráfico. Nota-se que a quantidade total de aço das lajes aumenta proporcionalmente com o aumento das dimensões destas.

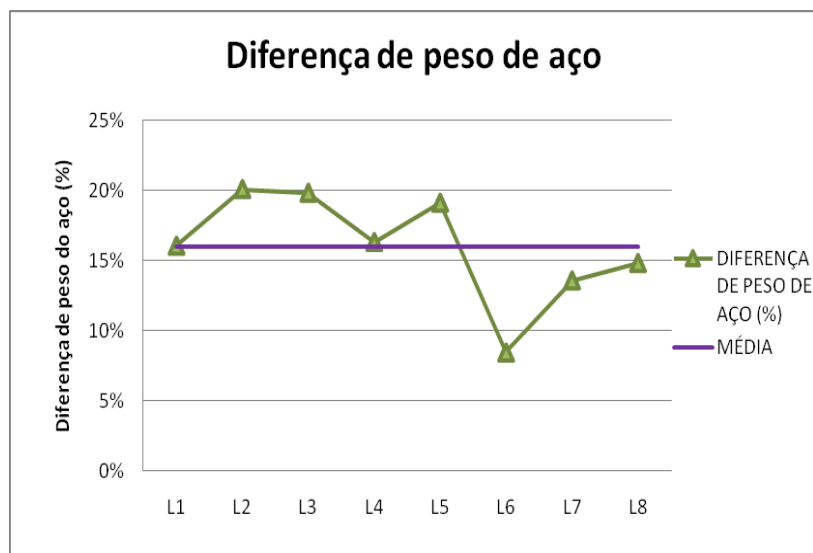
Figura 23 – Peso de aço em quilos



(fonte: elaborado pela autora)

Na figura 24, observa-se a diferença de peso de aço em percentual, entre as lajes nervuradas simples e duplas. Nota-se que esta diferença não estabelece uma relação linear com o aumento das dimensões das lajes, mas é em média em torno de 16%. Na laje 6, percebe-se um pico acentuado da redução desta diferença, possivelmente devido ao aumento das dimensões dos maciços.

Figura 24 – Diferença de peso de aço em percentual



(fonte: elaborado pela autora)

6.5 TAXA DE ARMADURA

A taxa de armadura é o peso total do aço contido na laje, dividido pela área da laje. A taxa de armadura é utilizada como indicativo de custos das estruturas. No quadro 12, estão relacionadas as taxas de armaduras para as lajes nervuradas simples e duplas.

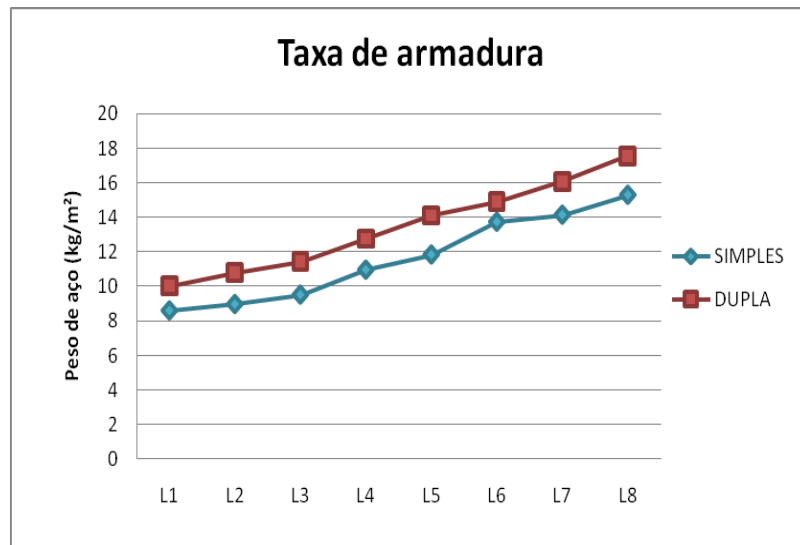
Quadro 12 – Taxas de armadura

LAJE	TIPO	TAXA DE ARMADURA (kg/m ²)
L1	SIMPLES	8,62
	DUPLA	10,01
L2	SIMPLES	8,99
	DUPLA	10,80
L3	SIMPLES	9,54
	DUPLA	11,43
L4	SIMPLES	10,98
	DUPLA	12,77
L5	SIMPLES	11,85
	DUPLA	14,12
L6	SIMPLES	13,74
	DUPLA	14,90
L7	SIMPLES	14,15
	DUPLA	16,07
L8	SIMPLES	15,30
	DUPLA	17,56

(fonte: elaborado pela autora)

A figura 25 apresenta as taxas de armaduras para as lajes em estudo em forma de gráfico. Nota-se que quanto maior as dimensões das lajes, maior a taxa de armadura, ou seja, mais quilos de aço por metro quadrado de laje. Percebe-se também neste gráfico que as taxas de armaduras das lajes nervuradas duplas são sempre maiores que as taxas de armadura das lajes nervuradas simples.

Figura 25 – Taxa de armadura



(fonte: elaborado pela autora)

6.6 COMPARAÇÃO DOS CUSTOS COM MATERIAIS

Visto que as lajes nervuradas duplas consomem mais concreto e aço que as simples, e menos EPS, foi feita a comparação dos custos com materiais para melhor analisar as diferenças entre os dois tipos de laje nervurada.

O quadro 13 apresenta o custo total com materiais, em Reais, para cada laje estudada e a diferença de custo em percentual entre as lajes nervuradas simples e duplas. Neste quadro nota-se que, nas lajes nas quais a diferença de custo é positiva, a laje nervurada simples possui menor custo com materiais que a laje nervurada dupla. Quando a diferença é negativa, a nervurada dupla é a menos dispendiosa.

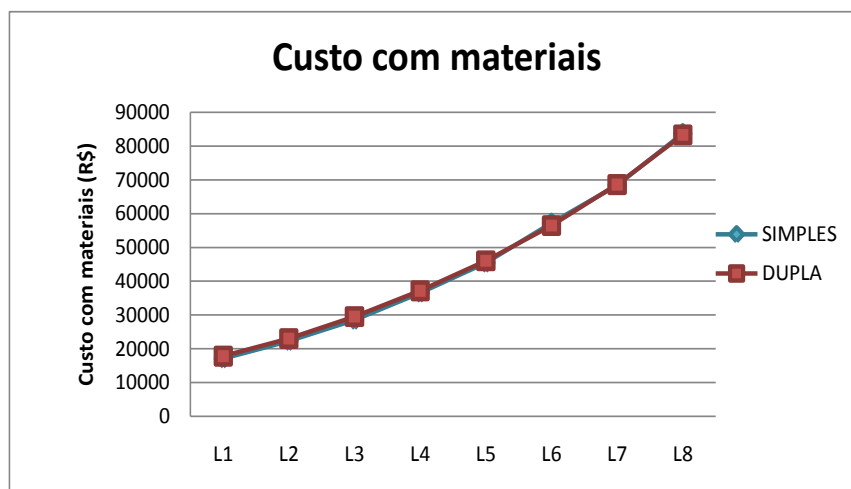
Quadro 13 – Comparação dos custos com materiais

LAJE	TIPO	CUSTO TOTAL (R\$)	DIFERENÇA DE CUSTO (%)
L1	SIMPLES	17065,75	4,3%
	DUPLA	17791,11	
L2	SIMPLES	22250,23	3,5%
	DUPLA	23033,33	
L3	SIMPLES	28495,98	3,6%
	DUPLA	29515,86	
L4	SIMPLES	36560,20	1,6%
	DUPLA	37163,16	
L5	SIMPLES	45450,29	1,3%
	DUPLA	46027,20	
L6	SIMPLES	57219,56	-1,3%
	DUPLA	56477,21	
L7	SIMPLES	68440,61	0,3%
	DUPLA	68642,19	
L8	SIMPLES	83769,54	-0,5%
	DUPLA	83383,86	

(fonte: elaborado pela autora)

A figura 26 apresenta em forma de gráfico os custos com materiais das lajes nervuradas simples e duplas. No gráfico, as linhas que representam as lajes nervuradas simples e duplas estão praticamente sobrepostas, o que representa a pequena diferença de custo entre elas.

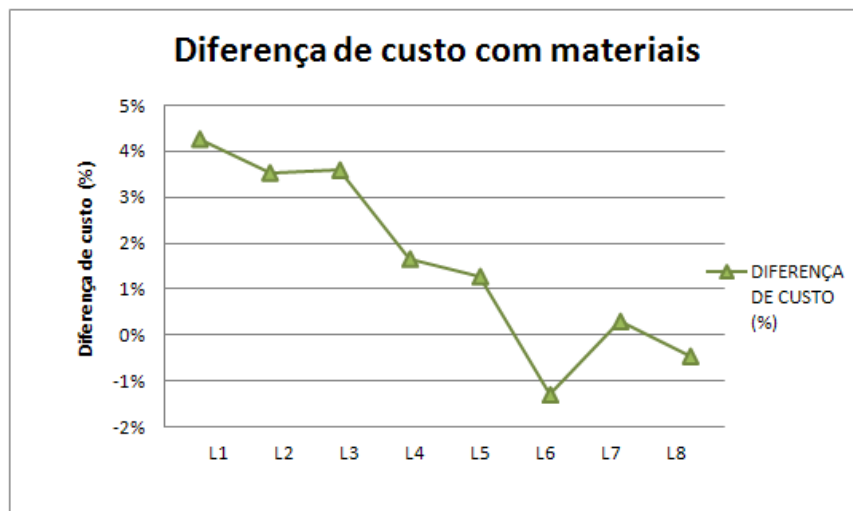
Figura 26 – Custo com materiais em Reais



(fonte: elaborado pela autora)

Na figura 27, está representada graficamente a diferença de custo com materiais em percentual entre as lajes nervuradas simples e duplas. Nota-se que, o aumento das dimensões das lajes implica na diminuição da diferença de custo, sendo esta negativa em duas das lajes em estudo. Novamente percebe-se um pico de redução da diferença sobre a laje 6, possivelmente devido ao aumento das dimensões dos maciços.

Figura 27 – Diferença de custo com materiais em percentual



(fonte: elaborado pela autora)

7 CONCLUSÃO

A escolha da solução estrutural a ser adotada depende de fatores econômicos e questões de funcionalidade. Na maioria dos casos, cada alternativa apresenta suas vantagens e desvantagens. Cabe assim ao projetista, estudar e determinar a alternativa mais adequada para cada situação.

Para as lajes estudadas neste trabalho, pôde-se concluir, através da análise dos quadros e gráficos, que as lajes nervuradas duplas consomem mais concreto e aço do que as lajes nervuradas simples, porém, demandam menor volume de EPS.

Para as lajes com vãos menores que 9 metros, o custo das lajes nervuradas duplas é superior ao das simples. Para estas lajes, a diferença de custo é inversamente proporcional ao aumento do vão. Para as lajes com vãos maiores que 9 metros, as lajes nervuradas duplas têm preço igual ou menor que a laje nervurada simples.

Nota-se também que, para as lajes analisadas neste trabalho, com vão maiores que 8 metros aproximadamente, a diferença de custo com materiais, entre os dois tipos de laje, é relativamente baixa. Com isso, pode-se concluir que, a escolha da utilização de laje nervurada simples ou dupla é determinada fundamentalmente por imposições arquitetônicas e funcionais da edificação, principalmente quando projetadas para grandes vãos.

Conclui-se que a maior vantagem da laje nervurada dupla, em relação à simples, é a sua menor espessura. Nas lajes estudadas neste trabalho, com vãos de aproximadamente 8 metros, observa-se uma redução de espessura de cerca de 6 centímetros. Para edifícios com muitos pavimentos, esta redução de espessura proporciona uma diminuição significativa da altura total da edificação, vindo, muitas vezes, a viabilizar um pavimento adicional.

Outra vantagem da laje nervurada dupla, em relação à simples, é a dispensa do uso de forro ou revestimento na parte inferior da laje, visto que, por apresentar capa de concreto inferior, a mesma apresenta uma superfície lisa e uniforme. O forro, muitas vezes necessário nas lajes nervuradas simples, principalmente naquelas com material de enchimento, vem a diminuir o pé direito do pavimento, além de aumentar o custo da construção.

Conclui-se ainda neste trabalho que a principal desvantagem da laje nervurada dupla em relação à simples é a necessidade de ser concretada em duas etapas. Identificou-se também a

necessidade de nivelamento ou utilização de concreto autoadensável na capa inferior da laje nervurada dupla, para evitar a formação de poças d'água embaixo dos blocos de EPS e possível enclausuramento de água dentro da laje.

Por fim, para as configurações analisadas neste trabalho, a laje nervurada dupla seria uma solução vantajosa para projetos que necessitam grandes vãos entre pilares, estacionamentos, por exemplo, ou em casos em que o projeto arquitetônico impõe a redução da altura total da edificação ou ainda quando não há exigência da execução de forro.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. M. **Curso de concreto armado**. 2. ed. Rio Grande: Dunas, 2003. v. 4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

CARVALHO, R. C. **Análise não-linear de pavimentos de edifícios de concreto através da analogia de grelha**. 1994. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Sistemas estruturais de lajes sem vigas**: subsídios para o projeto e execução. 1989. 260 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 1. ed. 7. tiragem. São Paulo: Pini, 1995 (tiragem 2007).

ROCHA, A. M. **Concreto armado**. 8. ed. 1. reimpr. São Paulo: Nobel, 1988 (reimpressão 1991). v. 4.

SOUZA, V. C. M.; CUNHA, A. J. P. **Lajes em concreto armado e protendido**. 2. ed. Niterói: EDUFF, 1998.

TQS INFORMÁTICA LTDA. Grelha – TQS: manual de critérios de projeto. In: _____. **Sistemas Computacionais – Engenharia Estrutural**. São Paulo: [2002a?]. p. 1-55.

_____. Grelha – TQS: manual de comandos e funções. In: _____. **Sistemas Computacionais – Engenharia Estrutural**. São Paulo: [2002b?]. p. 1-63.