

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ESTRUTURAS
UTILIZANDO LAJES DO TIPO BUBBLEDECK®

NIARA DIAS GUEDES
RAMON LAUTON ANDRADE

ORIENTADOR: MARCOS HONORATO DE OLIVEIRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
CIVIL

BRASÍLIA / DF
DEZEMBRO / 2015

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ESTRUTURAS
UTILIZANDO LAJES DO TIPO BUBBLEDECK®**

**NIARA DIAS GUEDES
RAMON LAUTON ANDRADE**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

**MARCOS HONORATO, DSc (ENC/FT/UnB)
(ORIENTADOR)**

**HENRIQUE JORGE NERY DE LIMA, MSc.
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**PAULO CHAVES DE REZENDE DE MARTINS, DSc (ENC/FT/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 04 de Dezembro de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

GUEDES, NIARA DIAS

ANDRADE, RAMON LAUTON

Avaliação de Desempenho de Estruturas utilizando Lajes do tipo Bubbledeck® [Distrito Federal] 2015.

vii, 93 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2015)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Sistema Bubbledeck®

2. Lajes Lisas

3. Pórtico Equivalente

4. Sistemas Estruturais

I. ENC/FT/UnB

II. Bacharel em Engenharia Civil (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GUEDES, NIARA D.; ANDRADE, RAMON LAUTON (2015) Avaliação de Desempenho de Estruturas utilizando Lajes do tipo Bubbledeck®. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 57 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTORES: Niara Dias Guedes

Ramon Lauton Andrade

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação de Desempenho de Estruturas utilizando Lajes do tipo Bubbledeck®.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2015

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito dos autores.

Niara Dias Guedes

QE 01 Conjunto M Casa 74 – Guará I

71020-131 – Brasília – DF - Brasil

Ramon Lauton Andrade

QNM 19 Conjunto D Casa 21 –

Ceilândia Sul

72215 - 194 – Brasília-DF – Brasil

RESUMO

Com a modernização da indústria da construção civil, surgem novas tecnologias e técnicas vão sendo aprimoradas visando menor custo, maior eficiência, maior praticidade e durabilidade, sem abrir mão da segurança e conforto aos usuários. Além disso, diante da atual situação de escassez de recursos e degradação do meio ambiente, torna-se necessário considerar a sustentabilidade da tecnologia em estudo. Dentro desse contexto, o sistema de lajes com vazios, ou lajes ocas, surge com a promessa de cumprir todos esses quesitos. O surgimento de tecnologias utilizando esse sistema, dentre elas BubbleDeck[®], Cobiax[®] e U-boot[®], vem com o objetivo de diminuir o consumo de concreto armado, economizando em fôrmas, buscando aliviar esforços da fundação, aumentar a produtividade, e, ainda, apresentando comportamento estrutural, acústico e térmico igual ou superior ao das lajes lisas tradicionais, além de possuírem certificados ambientais. Este projeto traz uma descrição desse novo sistema de lajes, expondo seus pontos positivos e negativos, as características das principais tecnologias de lajes com vazios e seus métodos construtivos, com foco na tecnologia BubbleDeck[®]. A fim de se analisar o desempenho desse método construtivo, este projeto irá fornecer o dimensionamento de uma laje BubbleDeck[®], os resultados encontrados para a mesma serão comparados a uma laje lisa tradicional que apresente valores de flecha equivalentes a da laje com vazios. Os parâmetros a serem discutidos serão o volume de concreto utilizado na edificação, os valores de momentos nas duas direções das lajes em questão, a taxa de armadura necessária e o carregamento nos pilares. Será apresentado ainda o detalhamento da estrutura de concreto armado para melhor visualização das diferenças entre os métodos.

Palavras-chave: Lajes, Lajes com vazios, Desempenho, BubbleDeck[®].

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	GENERALIDADES.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	4
1.3	JUSTIFICATIVA.....	4
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
2	MÉTODOS CONSTRUTIVOS.....	7
2.1	AIRDECK®.....	7
2.2	COBIAX®.....	9
2.3	U-BOOT®.....	10
2.4	BUBBLEDECK®.....	13
2.4.1	RESULTADO DE ENSAIOS E ESTUDOS.....	16
2.5	LAJES ALVEOLARES.....	18
3	MÉTODOS ANALÍTICOS DE CÁLCULO À FLEXÃO DE LAJES LISAS.....	21
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	21
3.2	MÉTODO DIRETO.....	23
3.2.1	DEFINIÇÕES.....	23
3.2.2	LIMITAÇÕES DO MÉTODO DIRETO.....	25
3.2.3	MOMENTO TOTAL DE REFERÊNCIA PARA UM VÃO.....	25
3.2.4	MOMENTOS DE REFERÊNCIA POSITIVOS E NEGATIVOS.....	26
3.2.5	DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS ENTRE AS FAIXAS.....	29
3.3	MÉTODO DO PÓRTICO EQUIVALENTE.....	29
3.4	SOFTWARE DE CÁLCULO ESTRUTURAL CAD/TQS.....	30
4	CONSIDERAÇÕES DE CÁLCULO PARA LAJES BUBBLEDECK®.....	32
4.1	Peso Próprio.....	32
4.2	Deflexão (flechas).....	33

4.3	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	33
5	PROJETO ESTRUTURAL	34
5.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DA EDIFICAÇÃO	34
5.2	PRÉ-DIMENSIONAMENTO	34
5.3	PLANTA DE FORMAS.....	36
6	RESULTADOS LAJES BUBBLEDECK®	40
6.1	DIMENSIONAMENTO UTILIZANDO O <i>SOFTWARE</i> cad/TQS.....	40
6.1.1	CÁLCULO DO PESO PRÓPRIO DAS LAJES BUBBLEDECK®	40
6.1.2	CARREGAMENTO DE ALVENARIA	44
6.1.3	DEMAIS CARREGAMENTOS ATUANTES	44
6.1.4	ESFORÇOS ENCONTRADOS	45
6.1.5	CÁLCULO DAS ARMADURAS.....	45
6.1.6	CÁLCULO DA FLECHA	48
6.2	DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DIRETO	52
6.2.1	CARREGAMENTOS ATUANTES.....	52
6.2.2	ESFORÇOS ENCONTRADOS	53
6.2.3	CÁLCULO DAS ARMADURAS.....	62
6.2.4	CÁLCULO DA FLECHA IMEDIATA E DIFERIDA	62
6.3	DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DO PÓRTICO EQUIVALENTE.....	63
6.3.1	CÁLCULO DAS ARMADURAS.....	66
6.3.2	FLECHAS E ALTURAS EQUIVALENTES	67
7	RESULTADOS LAJES LISAS.....	68
7.1	DIMENSIONAMENTO UTILIZANDO O <i>SOFTWARE</i> TQS.....	68
7.1.1	FLECHA E ALTURA EQUIVALENTE	69
7.1.2	CÁLCULO DA ARMADURA	69
7.2	DIMENSIONAMENTO UTILIZANDO O MÉTODO DIRETO.....	70
7.2.1	ESFORÇOS ENCONTRADOS	70

7.2.2	FLECHAS E ALTURAS EQUIVALENTES	77
7.2.3	CÁLCULO DAS ARMADURAS.....	77
7.3	DIMENSIONAMENTO UTILIZANDO O MÉTODO DO PÓRTICO EQUIVALENTE.....	78
7.3.1	FLECHAS E ALTURAS EQUIVALENTES	80
7.3.2	CÁLCULO DAS ARMADURAS.....	81
8	ANÁLISE COMPARATIVA.....	82
8.1	TAXAS DE ARMADURA	82
8.2	VOLUME DE CONCRETO	84
8.3	FLECHAS	85
8.4	MOMENTOS FLETORES.....	86
9	CONCLUSÕES	88
	CRONOGRAMA	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
	ANEXOS.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Comparação entre laje BubbleDeck® e laje lisa pelo teste de resistência a flexão	17
Tabela 2.2. Cobrimento mínimo para a armadura inferior em função do TRRF	18
Tabela 5.1. Tipos de Lajes BubbleDeck®	35
Tabela 6.1. Dados da laje BubbleDeck®	41
Tabela 6.2: Quantidade de módulos por painel	41
Tabela 6.3: Carga distribuída das lajes	44
Tabela 6.4: Valores do coeficiente ξ em função do tempo (NBR 6118/2014 Tabela 17.1)	51
Tabela 6.5. Flechas imediatas, diferidas e total das lajes BubbleDeck®	52
Tabela 6.6. Dados e resultados para as lajes do térreo, 1º e 2º pavimento, na direção principal	55
Tabela 6.7. Dados e resultados para as lajes do térreo, 1º e 2º pavimento, na direção secundária	56
Tabela 6.8. Dados e resultados para as lajes de cobertura, na direção principal	59
Tabela 6.9. Dados e resultados para as lajes de cobertura, na direção secundária	60
Tabela 6.10. Áreas de aço e quantidade de ferro para momentos máximos da laje da cobertura	62
Tabela 6.11. Áreas de aço e quantidade de ferro para momentos máximos da laje do térreo, 1º e 2º andar	62
Tabela 6.12: Flechas imediatas, diferidas e total das lajes BubbleDeck® pelo Método Direto	63
Tabela 6.13. Dados e momentos de referência para as lajes dos pavimentos tipo	64
Tabela 6.14. Momentos Distribuídos nas faixas	64
Tabela 6.15. Dados e momentos de referência para as lajes do pavimento cobertura	65
Tabela 6.16. Momentos distribuídos nas faixas da laje de cobertura	65
Tabela 6.17: Áreas de aço e quantidade de ferro para momentos máximos da laje lisa pelo Método dos Pórticos Equivalentes	67
Tabela 6.18: Flechas imediatas, diferidas e total das lajes BubbleDeck® pelo Método dos Pórticos Equivalentes	67
Tabela 7.1: valores correspondentes da laje lisa em relação à laje BubbleDeck® para a mesma flecha pelo TQS	69

Tabela 7.2: Áreas de aço e quantidade de ferro para momentos máximos da laje lisa pelo TQS	69
Tabela 7.3. Dados e resultados para as lajes do térreo, 1º e 2º pavimento, na direção principal.....	70
Tabela 7.4. Dados e resultados para as lajes do térreo, 1º e 2º pavimento, na direção secundária.....	71
Tabela 7.5. Dados e resultados para as lajes da cobertura, na direção principal.....	74
Tabela 7.6. Dados e resultados para as lajes da cobertura, na direção secundária.....	75
Tabela 7.7: Valores correspondentes da laje lisa em relação à laje BubbleDeck® para a mesma flecha pelo Método Direto	77
Tabela 7.8: Áreas de aço e quantidade de ferro para momentos máximos da laje lisa pelo Método Direto	77
Tabela 7.9. Momentos de Referência para o Pavimento Tipo	78
Tabela 7.10. Momentos distribuídos nas faixas do Pavimento Tipo	78
Tabela 7.11. Momentos de referencia para o pavimento cobertura	79
Tabela 7.12. Momentos distribuídos nas faixas para Laje de Cobertura	79
Tabela 7.13: Valores correspondentes da laje lisa em relação à laje BubbleDeck® para a mesma flecha pelo Método dos Pórticos Equivalentes	81
Tabela 7.14: Áreas de aço e quantidade de ferro para momentos máximos da laje lisa pelo Método dos Pórticos Equivalentes	81
Tabela 8.1: Taxa de armadura das lajes BubbleDeck®	83
Tabela 8.2: Taxa de armadura das lajes lisas	83
Tabela 8.3: Volume de concreto das lajes e aumento em relação à BubbleDeck®	84
Tabela 8.4. Flecha Total (mm) para as lajes BubbleDeck® nos três métodos adotados ...	85
Tabela 8.5. Flecha Total (mm) para as lajes lisas maciças nos três métodos adotados.	85
Tabela 8.6. Momentos característicos máximos (kN.m) atuantes nas lajes BubbleDeck® e lisa maciça para os três métodos de dimensionamento.	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Região sujeita a punção em lajes lisas do tipo BubbleDeck®	2
Figura 2.1. Sistema de climatização embutidos em lajes Airdeck® (fonte: http://www.airdeck.com).....	7
Figura 2.2. Laje do tipo Airdeck® (fonte: http://www.airdeck.com)	8
Figura 2.3. Sistema Construtivo Airdeck® (fonte: http://www.airdeck.com)	8
Figura 2.4. Edifício sede da UEFA (fonte: http://www.cobiax.com)	9
Figura 2.5. Sistema Construtivo Cobiax® com módulos esféricos (fonte: http://www.ferca.pt/)	10
Figura 2.6. Sistema Construtivo Cobiax® com módulos elípticos (fonte: http://www.ferca.pt/)	10
Figura 2.7. Vulcano Buono Naples (fonte: http://www.ipmitalia.it)	11
Figura 2.8. City Life (fonte: http://br.daliform.com)	11
Figura 2.9. Módulos de lajes U-boot® (fonte: http://br.daliform.com).....	12
Figura 2.10. Sistema construtivo de lajes U-boot® (fonte: http://br.daliform.com).....	12
Figura 2.11. Lajes BubbleDeck® (fonte: Apresentação Bubbledeck®)	13
Figura 2.12. Millennium Tower, Rotterdam (fonte: www.ecopedia.com).....	14
Figura 2.13. Le Coie Hotel, Reino Unido (fonte: www.bdkarchitects.com)	15
Figura 2.14. Centro Administrativo do Distrito Federal (fonte: Apresentação BubbleDeck®)	15
Figura 2.15. Construção Edifício Garagem Galeão - Rio de Janeiro (RJ) (fonte: Apresentação BubbleDeck®).....	15
Figura 2.16. Transporte de painel de Laje Alveolar (fonte: www.protensul.com.br)	19
Figura 2.17. Posicionamento dos moldes dos vazios das Lajes Alveolares (fonte: MIGLIORE, Gabriel, Dimensionamento e utilização de laje alveolar protendida).....	20
Figura 3.1. Diferença entre ábaco e capitel em lajes cogumelos [NETO, A.F.L. 2012]....	21
Figura 3.2. Esquema representativo de um painel de laje e seus comprimentos de vãos ..	23
Figura 3.3. Divisão da laje em faixas laterais	24
Figura 3.4. Divisão de faixas para painéis adjacentes	24
Figura 3.5. Exemplos de seções quadradas equivalentes para pilares não retangulares	26
Figura 3.6. Distribuição do momento de referencia para lajes lisas sem viga de borda	27
Figura 3.7. Momentos de referência no pórtico equivalente	28
Figura 3.8. Desenho representativo da divisão da lajes em faixas	30

Figura 5.1. Planta de Arquitetura do pavimento tipo, sem escala	37
Figura 5.2. Planta de formas tipo para lajes BubbleDeck®	38
Figura 5.3. Planta de formas de cobertura para lajes BubbleDeck®	39
Figura 6.1. Detalhe construtivo Laje BubbleDeck®	41
Figura 6.2: Painel da laje de cobertura BubbleDeck®	42
Figura 6.3: Painel de laje BubbleDeck® do térreo, 1° e 2° andar.....	43
Figura 6.4. Faixas de Projeto na direção principal	53
Figura 6.5. Faixas de Projeto na direção secundária	54
Figura 6.6. Momentos da faixa de projeto 1, na direção principal, para as lajes do térreo, 1° e 2° pavimento	55
Figura 6.7. Momentos da faixa de projeto 2, na direção principal, para as lajes do térreo, 1° e 2° pavimento	55
Figura 6.8: Momentos na direção secundária na faixa de projeto 1, para as lajes do térreo, 1° e 2° pavimento.....	56
Figura 6.9: Momentos na direção secundária na faixa de projeto 2, para as lajes do térreo, 1° e 2° pavimento.....	57
Figura 6.10. Resultados finais de momentos para o pavimento tipo na direção principal.	57
Figura 6.11. Resultados finais de momentos para o pavimento tipo na direção secundária	58
Figura 6.12. Momentos da faixa de projeto 1, na direção principal, para as lajes da cobertura	59
Figura 6.13. Momentos da faixa de projeto 2, na direção principal, para as lajes da cobertura	59
Figura 6.14. Momentos da faixa de projeto 1, na direção secundária, para as lajes da cobertura.....	60
Figura 6.15. Momentos da faixa de projeto 2, na direção secundária, para as lajes da cobertura.....	60
Figura 6.16. Resultados finais de momentos para o pavimento cobertura na direção principal	61
Figura 6.17. Resultados finais de momentos para o pavimento cobertura na direção secundária.....	61
Figura 6.18. Faixas de pilares para Método do Pórtico Equivalente na direção principal.	63
Figura 6.19. Pórtico Equivalente para lajes do Pavimento Tipo	64

Figura 6.20. Diagrama de Momentos Fletores de Referência para lajes de Pavimento Tipo	65
Figura 6.21. Resultados finais de momentos para o Pavimento Tipo	65
Figura 6.22. Pórtico equivalente para lajes do pavimento cobertura	66
Figura 6.23. Diagrama de Momentos Fletores de Referência para lajes do Pavimento Cobertura.....	66
Figura 6.24. Momentos finais Laje de Cobertura.....	66
Figura 7.1. Momentos da faixa de projeto 1, na direção principal, para as lajes do térreo, 1° e 2° pavimento	70
Figura 7.2. Momentos da faixa de projeto 2, na direção principal, para as lajes do térreo, 1° e 2° pavimento	71
Figura 7.3. Momentos da faixa de projeto 1, na direção secundária, para as lajes do térreo, 1° e 2° pavimento.....	71
Figura 7.4. Momentos da faixa de projeto 2, na direção secundária, para as lajes do térreo, 1° e 2° pavimento.....	72
Figura 7.5. Resultados finais de momentos para o pavimento tipo na direção principal ...	72
Figura 7.6. Resultados finais de momentos para o pavimento tipo na direção secundária	73
Figura 7.7. Momentos da faixa de projeto 1, na direção principal, para as lajes de cobertura	74
Figura 7.8. Momentos da faixa de projeto 2, na direção principal, para as lajes de cobertura	74
Figura 7.9. Momentos da faixa de projeto 1, na direção secundária, para as lajes de cobertura	75
Figura 7.10. Momentos da faixa de projeto 2, na direção principal, para as lajes de cobertura	75
Figura 7.11. Resultados finais de momentos para o pavimento cobertura na direção principal	76
Figura 7.12. Resultados finais de momentos para o pavimento cobertura na direção secundária.....	76
Figura 7.13. Pórtico Equivalente para Pavimento Tipo	78
Figura 7.14. Diagrama de Momentos Fletores de Referencia para Pórtico P1 do Pavimento tipo.....	79
Figura 7.15. Resultados finais para Pórtico Equivalente do Pavimento Tipo	79
Figura 7.16. Pórtico Equivalente P1 para Pavimento Cobertura.....	80

Figura 7.17. Momentos Fletores Pórtico Equivalente P1 Pavimento Cobertura	80
Figura 7.18. Momentos Finais para a Laje de Cobertura pelo Método do Pórtico Equivalente	80
.....	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

A espessura de uma laje de concreto armado é função do vão a ser vencido, buscando evitar desconfortos gerados por deformações ou vibrações excessivas. Assim sendo, para grandes vãos as lajes maciças podem exigir espessuras tão elevadas, que grande parte de sua capacidade resistente estaria voltada para as solicitações devidas ao peso próprio da estrutura, tornando essa solução muitas vezes não funcional e antieconômica.

Dentro desse contexto, é interessante utilizar um sistema estrutural que apresente comportamento semelhante ao das lajes maciças, porém, com peso próprio relativamente baixo e inércia tão maior quanto possível. Essa redução do peso próprio pode ser feita suprimindo-se a zona tracionada do concreto, já que a capacidade resistente da mesma é desprezada no dimensionamento estrutural devido à baixa resistência à tração do concreto quando comparada com a resistência à compressão. Esse conceito é empregado, por exemplo, em lajes nervuradas, nas quais a zona de tração é constituída por nervuras onde se concentram as armaduras de tração. Nessa região pode ser adicionado material inerte – sem função estrutural – com a finalidade de permitir um acabamento plano e proteger as barras das armaduras.

Tentando trabalhar com o conceito apresentado, algumas técnicas foram desenvolvidas utilizando sistemas estruturais baseados em lajes com vazios. A concepção das lajes com vazios baseia-se na inserção de módulos que ocupam o lugar do concreto tracionado na estrutura. Esses módulos não têm geometria específica, os diferentes tipos são definidos de acordo com os requisitos dos projetos, tais como os carregamentos e vãos entre colunas. No entanto, em geral, apresentam formatos que facilitam a execução, a ancoragem das barras de aço e aperfeiçoam a ocupação dos vazios. Na sua grande maioria, os módulos são sólidos ocos, feitos de material resistente e de custo relativamente baixo, muitas vezes de materiais recicláveis. Há também sistemas construtivos que utilizam materiais alternativos como forma de preencher os vazios, como, por exemplo, blocos sólidos poliméricos.

Na grande maioria dos casos os módulos são igualmente espaçados entre si, com distância pré-definida, e são fixados entre a armadura positiva e a negativa da laje. Durante o processo de concretagem deve-se ter cuidado com a possível flutuação e deslocamento lateral dos módulos, assim, muitas vezes é necessário realizar o processo da concretagem em duas etapas,

em que a primeira tem a finalidade de dar ancoragem aos módulos, formando as chamadas pré-lajes, e a segunda é responsável pela concretagem dos demais espaços que irão compor o volume da placa.

Alguns dos sistemas que utilizam lajes com vazios podem ser classificados como lajes lisas, as quais, segundo o item 14.7.8 da ABNT NBR 6118:2014, são lajes que se apoiam diretamente nos pilares, sem a utilização de capitéis. Nesse sistema construtivo existe uma preocupação com o fenômeno de punção, que é o estado limite último determinado por cisalhamento em torno de regiões onde existem forças concentradas. Nas lajes lisas essa situação geralmente ocorre na região de ligação laje-pilar, e a ruptura devida à punção pode se dar de forma abrupta e frágil. As zonas com vazios, então, não devem incluir a região dos apoios (pilares), como apresentado na figura 1.1 a seguir, onde há grande concentração de esforços (cisalhamento e momentos fletores negativos elevados). Nessas regiões a laje deve ser maciça para resistir aos esforços presentes.

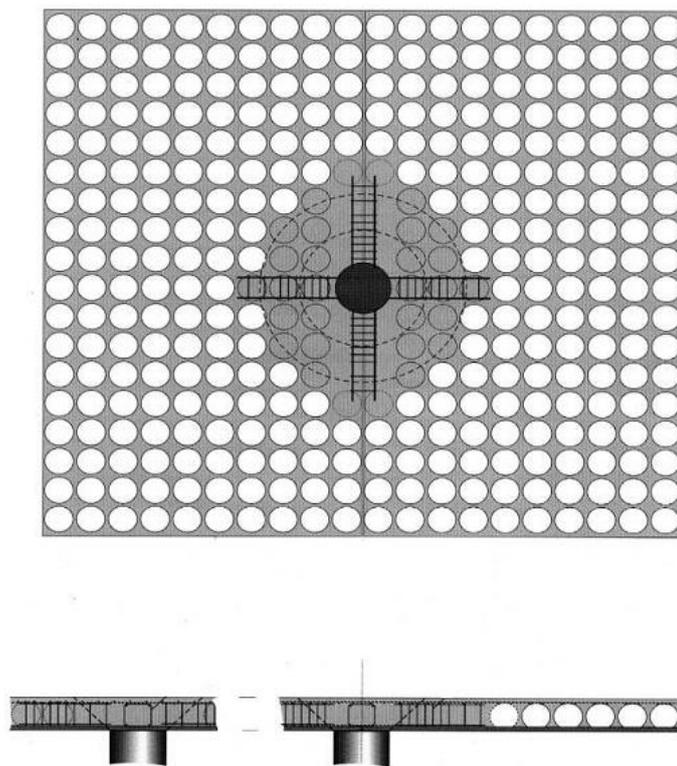


Figura 1.1. Região sujeita a punção em lajes lisas do tipo BubbleDeck®

Testes feitos em laboratório com o sistema BubbleDeck® mostraram que lajes com vazios não apresentam boa resistência a esforços de cisalhamento nas regiões com cargas concentradas, junto aos pilares, fato que se explica pela ausência do concreto no lugar de vazios. O concreto nessas regiões tem função estrutural, resistindo aos esforços cortantes, e essa resistência está diretamente relacionada à espessura da laje de concreto. Diante desses fatos, em

regiões próximas aos pilares, com distância determinada por norma, não são empregados o uso de vazios e sim considerando uma região maciça como no sistema convencional de lajes lisas, aplicando-se em muitos casos a utilização de armaduras de cisalhamento.

Os sistemas construtivos de lajes com vazios apresentam uma série de vantagens que são consequência da redução do volume de concreto. Pode-se destacar:

- Obtenção de estruturas com peso próprio reduzido para lajes que vencem grandes vãos. Em consequência disso, tanto a quantidade, quanto a seção transversal dos pilares pode ser reduzida. Esse sistema, por exemplo, é vantajoso para locais como garagens, onde os pilares dificultariam a manobra dos veículos ou ainda ocupariam regiões que serviriam como vagas;
- O menor consumo de concreto em relação ao sistema de lajes maciças gera um alívio no carregamento sobre as fundações;
- Redução na deformação das lajes em relação a lajes lisas maciças;
- Possibilidade de se trabalhar com dutos e tubulações em seu interior, podendo incorporar sistemas de climatização, dutos de instalações elétricas e encanamentos.

Pesquisas de monografia feitas nesta área, mostram que o sistema proporciona um ganho significativo em produtividade na execução. Tal produtividade se deve a fatores como redução da quantidade de fôrmas em relação a outros sistemas, facilidade em estocar os módulos na obra e a diminuição da mão-de-obra. Por utilizar menos concreto e aço, economiza-se também no transporte, já que serão necessários menos caminhões betoneiras.

Segundo relatórios de ensaios realizados com lajes BubbleDeck[®], todos os sistemas de lajes com vazios estudados aqui apresentam resultados satisfatórios, semelhantes aos de lajes lisas maciça, em relação à resistência ao fogo e conforto térmico e acústico.

Contudo, há algumas desvantagens de se trabalhar com esse tipo de laje. Dentre elas podem ser citadas:

- O fenômeno de punção na região dos pilares;
- Grandes deslocamentos transversais nas bordas livres e pequena rigidez da estrutura às ações laterais, quando comparadas a estruturas convencionais.
- A colocação de eletrodutos, ou quaisquer outros dutos embutidos, exige cuidados especiais na execução, pois se efetuada na mesa comprimida poderá comprometer a resistência e estabilidade da laje, devendo então ser realizada na região das nervuras;

- Em virtude da laje maciça ser uma estrutura monolítica, apresenta segurança superior às lajes com vazios, embora essas reservas não sejam computadas no cálculo.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho de lajes lisas com vazios a partir do dimensionamento de uma edificação típica e comparar os resultados para diferentes métodos analíticos de dimensionamento de lajes lisas.

O objetivo específico consiste em avaliar o desempenho de lajes lisas do tipo BubbleDeck[®], através de um comparativo dos resultados obtidos utilizando métodos analíticos de dimensionamento do pórtico equivalente, do método direto e da utilização do *software* de cálculo estrutural CAD/TQS. Serão apresentados e avaliados os parâmetros utilizados para o dimensionamento desse sistema construtivo nas edificações.

1.3 JUSTIFICATIVA

O estudo de soluções que sejam simples, eficazes e que tragam redução de custos, versatilidade e rapidez nas aplicações é crescente na construção civil. Por apresentarem uma série de vantagens, as diversas tipologias de lajes lisas com vazios têm sido adotadas como soluções para vários empreendimentos.

A motivação para este trabalho encontra-se, então, nas vantagens apresentadas pelo fabricante do sistema construtivo de lajes com vazios do tipo BubbleDeck[®] e pela sua crescente utilização no cenário nacional e internacional.

A análise dos parâmetros de dimensionamento dessa estrutura justifica-se também por ainda não existir norma brasileira que trata do assunto. O tema é abordado na norma alemã DIN 1045 (2001) para construções em concreto armado, na norma britânica EN 13747 (2005) e, além destas, há algumas considerações de lajes com vazios esféricos na norma vietnamita.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por nove capítulos, em que o primeiro se trata da introdução, composta de generalidades a respeito do tema proposto, objetivos, justificativas e a estrutura

do trabalho. O conteúdo presente nos demais é apresentado sucintamente nos parágrafos seguintes.

No Capítulo 2 são apresentados alguns métodos construtivos de lajes com vazios que são utilizados atualmente. São eles: Airdeck[®], Cobiax[®], U-boot[®], BubbleDeck[®] e Lajes Alveolares. Para cada um desses sistemas, é apresentado o histórico de seu surgimento, as principais obras realizadas no cenário nacional e internacional e seu método de execução. Para lajes BubbleDeck[®] são apresentados, ainda, resultados de ensaios e estudos realizados pela franquia com o intuito de demonstrar seus benefícios da mesma com relação aos sistemas convencionais.

No Capítulo 3 são apresentados os métodos analíticos de cálculo à flexão de lajes lisas. Nesse trabalho serão analisados apenas dois dos principais métodos elásticos que são: o método do pórtico equivalente e o método direto. Além desses, é apresentada, como opção para o dimensionamento, a utilização do *software* de cálculo estrutural CAD/TQS.

No Capítulo 4 são apresentadas as considerações de cálculo para o dimensionamento de lajes BubbleDeck[®], que apresentam alteração quanto a posição da linha neutra, alteração do peso próprio da laje, redução na deflexão e alteração na resistência ao cisalhamento em relação a uma laje lisa maciça de mesma espessura.

No Capítulo 5 é apresentado o projeto da edificação em estudo, apresentando a planta de arquitetura e a planta de formas em anexo, obtidas através do pré-dimensionamento do edifício para o qual se realizará o dimensionamento e o detalhamento com os métodos citados para lajes lisas maciças e lajes BubbleDeck[®], a fim de realizar um comparativo entre os resultados obtidos para cada um desses sistemas construtivos.

No Capítulo 6 é apresentado os resultados obtidos para a estrutura utilizando a tecnologia de lajes com vazios BubbleDeck[®]. O capítulo é subdividido em cada um dos métodos adotados para o cálculo à flexão das lajes, sejam eles, método direto, método do pórtico equivalente e a utilização do *software* CAD/TQS. Para cada um dos métodos é apresentado os momentos encontrados, a taxa de armadura e o cálculo das flechas.

A estrutura do Capítulo 7 é semelhante à do Capítulo 6, com a diferença que este apresenta os resultados obtidos para a edificação projetada em laje lisa maciça, assim podendo realizar em seguida análise comparativa entre os métodos construtivos.

O Capítulo 8 apresenta uma comparação dos resultados obtidos nos capítulos 6 e 7 (momentos máximos, taxa de armadura e flechas), para cada um dos métodos aqui estudados. Além desses, ainda é calculado e comparado o volume de concreto.

O último capítulo traz a conclusão do trabalho, demonstrando as vantagens e desvantagens da utilização da laje com vazios BubbleDeck[®] em relação à uma laje lisa maciça com flecha

equivalente, realizando ainda um comparativo dos resultados presentes com aqueles que são apresentados pelo fabricante.

Por fim, são apresentadas as referências e os anexos.

2 MÉTODOS CONSTRUTIVOS

Em processo de expansão, as lajes com vazios vêm se tornando populares e tomando espaço na construção civil. Em busca da melhor tecnologia que atenda as exigências de mercado, diversos tipos de sistemas de lajes com vazios estão sendo desenvolvidos. Podemos listar cinco dos principais sistemas construtivos de lajes com vazios que vem criando nome no mercado mundial, são elas: Airdeck[®], Cobiax[®], U-boot[®], BubbleDeck[®] e Lajes Alveolares.

2.1 AIRDECK[®]

As lajes biaxiais com vazios Airdeck[®] são de origem holandesa, patenteadas em 2003. Seus vazios são determinados por módulos com formato de caixas, com alturas que podem variar de 120 mm a 350 mm, usadas de acordo com as propriedades das lajes a serem construídas, como formato e carregamento. O objetivo principal desse tipo de laje é a redução de concreto através de seus vazios. Com a redução de concreto, diminui-se o peso próprio, possibilitando maiores vãos e menores cargas transmitidas para a fundação. Outras vantagens podem ser listadas, como: redução no tempo de construção, praticidade no transporte, menor consumo de água, menor consumo de aço e ainda a possibilidade de integração da laje com sistema de climatização, constituído por canalização aproveitando os espaços intra-módulos, traçados como serpentina. Esse sistema de climatização tem por objetivo manter a temperatura do ambiente homogênea pela utilização de água com temperatura regulável, através de canalização no piso e no teto (figura 2.1). Uma das desvantagens desse método é pelo fato de sua concretagem não ser feito *in-loco*, necessitando de locomoção dos painéis da central para a obra;

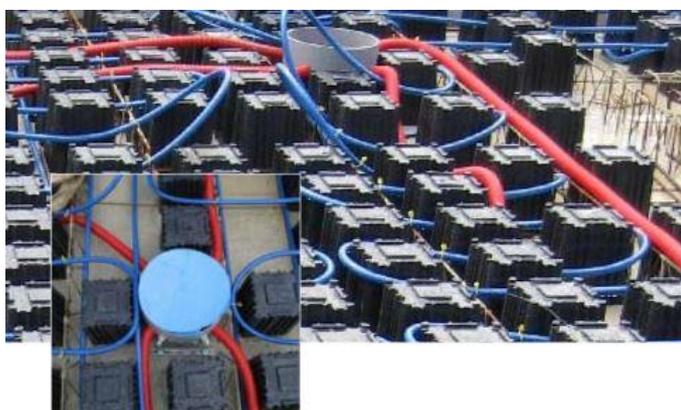


Figura 2.1. Sistema de climatização embutidos em lajes Airdeck[®] (fonte: <http://www.airdeck.com>)

No método construtivo das lajes Airdeck®, primeiramente é feito o preparo em obra da estrutura que irá receber os painéis de laje já concretados. Simultaneamente, ou posteriormente, é feito a concretagem da laje, em duas etapas. A primeira é uma etapa pré-moldada, com o posicionamento dos módulos sobre uma camada de 6 cm de concreto. Essa etapa não é feita *in-loco*, sendo realizada em centrais de pré-moldados, com posterior transportadas placas para o local da obra. Depois de recebidas na obra, as pré-lajes são içadas por um braço mecânico ou por guindaste até o nível da laje (Figura 2.2). Após esse processo, é feito o posicionamento das armaduras de acordo com o projeto estrutural. A partir daí segue a segunda etapa da concretagem, com o concreto lançado sobre os módulos e vibrado para a realização do adensamento.



Figura 2.2. Laje do tipo Airdeck® (fonte: <http://www.airdeck.com>)

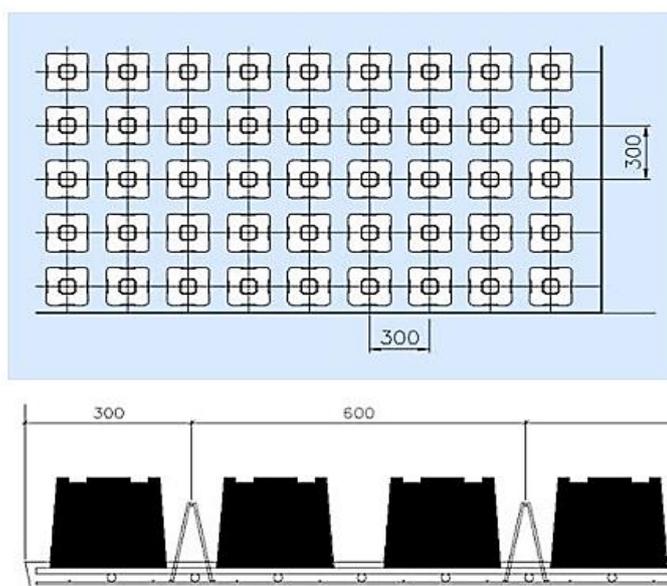


Figura 2.3. Sistema Construtivo Airdeck® (fonte: <http://www.airdeck.com>)

2.2 COBIAX®

Criada em 1997 e de origem suíça, o sistema Cobiax® também usa o mesmo princípio de se criar vazios no concreto em lajes com o intuito de deixar a estrutura mais leve. Empreiteiros de construção, arquitetos e projetistas de estruturas estão usando a tecnologia Cobiax® para criar estruturas de casas a aeroportos. Só em 2013 foram construídas mais de 1,2 milhões de m² de lajes utilizando o sistema Cobiax®. Como principais obras, podemos citar a sede da UEFA (Figura 2.4), na Suíça e o Estádio Nacional de Vasórvia, Polônia.

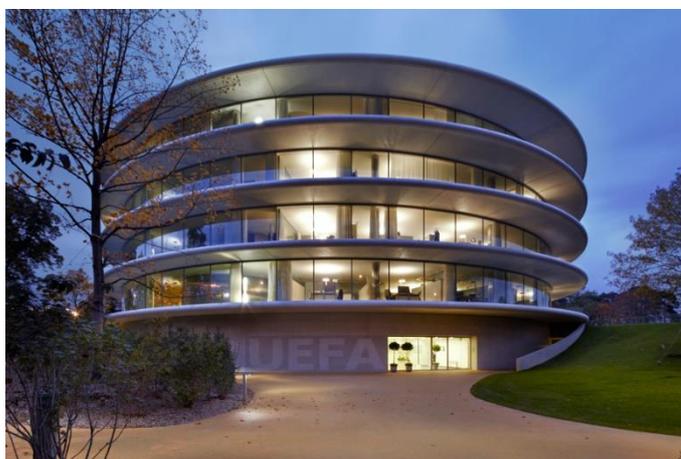


Figura 2.4. Edifício sede da UEFA (fonte: <http://www.cobiax.com>)

O sistema se baseia em introduzir vazios de forma esférica ou elipsoidal em zonas onde o concreto pouco influencia o funcionamento e a resistência da laje. Além da diminuição do peso próprio da estrutura (cerca de 30%), o sistema Cobiax®, assim como nos outros métodos de lajes com vazios, proporciona aumento dos vãos; redução no consumo de concreto e aço e ganho em velocidade de construção.

O sistema Cobiax® é composto por duas linhas diferentes, em termos dos módulos. A primeira com módulos elipsoidais com alturas que variam de 100 mm a 220 mm para lajes de 200 mm a 360 mm, e a segunda, com módulos de formato esférico e altura variável, indo de 270 mm a 450 mm de altura, para lajes de 360 mm a 600 mm. O sistema é composto pelos módulos de vazios e pelas grelhas que as contém.

A execução de uma laje tipo Cobiax® respeita os mesmos princípios e procedimentos da montagem de uma laje maciça sendo as grelhas colocadas e fixas diretamente sobre a armadura inferior. Como pode-se ver na figura 2.5, as grelhas ainda servem de apoio para as armaduras

superiores. Em obra, o conjunto grelha mais módulo é diretamente posicionado encima da forma da laje. Devido à possibilidade de flutuação e movimentação lateral dos módulos durante o processo de concretagem, este é dividido em duas etapas. Na primeira ocorre o preenchimento do fundo da laje até cerca de 8 cm, suficiente para cobrir as armaduras e a parte inferior das grelhas. A segunda etapa ocorre logo depois que a grelha esteja suficientemente ancorada, para o término da concretagem.



Figura 2.5. Sistema Construtivo Cobiax® com módulos esféricos (fonte: <http://www.ferca.pt/>)



Figura 2.6. Sistema Construtivo Cobiax® com módulos elípticos (fonte: <http://www.ferca.pt/>)

2.3 U-BOOT®

Em 2001 a empresa italiana Daliform desenvolveu um sistema de lajes com vazios, o U-boot®. A Daliform desde 1993, se distingue pela capacidade de criar produtos evoluídos, em

plástico reciclado, para a construção civil. O sistema U-boot[®] foi criado com objetivo de tornar a estrutura mais leve e de reduzir os custos com transportes. Podemos citar algumas grandes obras utilizando o sistema U-boot[®] como Vulcano Buono Naples (figura 2.7) e o City Life (figura 2.8), ambos na Itália.



Figura 2.7. Vulcano Buono Naples (fonte: <http://www.ipmitalia.it>)

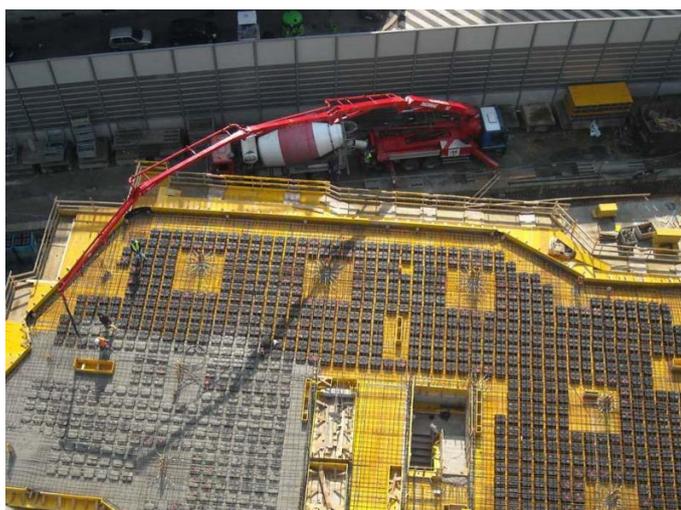


Figura 2.8. City Life (fonte: <http://br.daliform.com>)

O sistema se aplica a lajes lisas biaxiais e consiste na introdução de módulos de vazios em forma de caixas no interior da laje, em regiões em que o concreto apresenta esforços de tração. Seus módulos de vazios são feitos de polipropileno reciclado, e são comercializados em diversas dimensões, que variam de 160 mm a 560 mm. Os módulos possuem “pés” em forma de cone para mantê-las elevadas durante a concretagem (figuras 2.9 e 2.10).

As vantagens do U-boot[®] são praticamente as mesmas dos outros sistemas de lajes com vazios: redução das quantidades de concreto e aço; diminuição do peso próprio da estrutura, e por consequência, diminuição das cargas de fundação; diminuição do número e redução na

seção dos pilares; possibilidade de vencer grandes vãos (acima de 20 metros); economia no transporte e fácil armazenagem. Um diferencial desse sistema é a possibilidade de se utilizar em lajes em uma direção, graças aos acessórios de “pontes”, que são pequenas aletas que permite a fixação dos módulos entre si, como braços.

O seu método construtivo se assemelha bastante aos métodos de outros sistemas de lajes com vazios. Primeiramente uma superfície deve ser colocada para receber a laje em obra. Após isso, coloca-se a ferragem inferior, que irá suportar os momentos positivos, posicionada de acordo com o projeto. Os módulos, então, são posicionados e ligados por abas laterais, próprias dos módulos. Assim como nos outros sistemas, os módulos são suscetíveis à flutuação, por isso a concretagem do U-boot[®] é dividida em duas etapas. Na primeira, ocorre a concretagem para a fixação dos módulos e a segunda, após o concreto da primeira etapa ficar em estado semissólido, preenche-se com concreto o que restava. Graças aos pés cônicos do U-boot[®], o concreto pode penetrar com mais facilidade na região inferior do módulo.

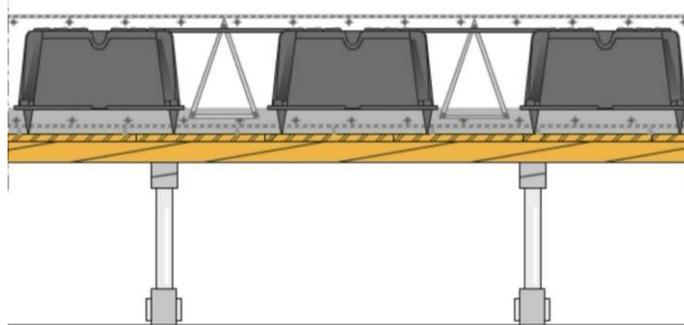


Figura 2.9. Módulos de lajes U-boot[®] (fonte: <http://br.daliform.com>)



Figura 2.10. Sistema construtivo de lajes U-boot[®] (fonte: <http://br.daliform.com>)

2.4 BUBBLEDECK®

O conceito de lajes BubbleDeck® foi desenvolvido na Dinamarca, em meados da década de 1980, pelo engenheiro dinamarquês Jorgen Breuning em um concurso nacional com o objetivo de desenvolver soluções ecológicas e econômicas para construções, que também fossem flexíveis e aplicáveis em larga escala.

O sistema construtivo é formado por esferas plásticas que são combinadas com malhas de aço superiores e inferiores para formar pré-lajes inferior de BubbleDecks®, formando módulos pré-fabricados. Essas pré-lajes podem já incluir reforços necessários para os momentos fletores. Quando os módulos não são empregados com a pré-laje são denominados de módulos básicos. Os módulos pré-fabricados BubbleDeck® são produzidos despejando-se uma camada de concreto no módulo básico. No local final de posicionamento, os elementos individuais são então ligados através de barras de ligação simplesmente posicionada nas juntas entre os elementos. Após a colocação das armaduras complementares, a camada final de concreto é despejada e curada.

As esferas introduzidas na intersecção das armaduras substituem o concreto que não desempenharia função estrutural. Assim, pode-se reduzir em até 35% o peso próprio da laje, comparada à uma laje maciça convencional, proporcionando um alívio no carregamento sobre as fundações.



Figura 2.11. Lajes *BubbleDeck*® (fonte: Apresentação Bubbledeck®)

A primeira obra em que foi utilizada esta tecnologia foi a *Millennium Tower* (figura 2.12), em Rotterdam, na Holanda, em que se percebeu uma economia de tempo e dinheiro consideráveis na utilização das lajes BubbleDeck®. Com essa escolha houve também uma

redução no pé-direito, devido à não utilização de vigas, diminuindo a altura geral da construção, o que permitiu que fossem adicionados dois andares em relação ao projeto inicial.



Figura 2.12. Millennium Tower, Rotterdam (fonte: www.ecopedia.com)

Outras obras de destaque são *City Hall and Office*, primeiro projeto dinamarquês com o sistema em questão; e *Le Coie Hotel* (figura 2.13), Jersey, Reino Unido, executada seis semanas antes do prazo, maior estrutura BubbleDeck[®] construída na Grã-Bretanha.

No Brasil, a primeira obra a utilizar esta tecnologia foi a ampliação da sede da construtora Norberto Odebrecht, em Salvador (BA). A tecnologia também foi escolhida como sistema construtivo das lajes do novo Centro Administrativo do Distrito Federal (CA-DF), como ilustrado na figura 2.14, por apresentar melhor produtividade e impacto ambiental substancialmente reduzido. Há também a obra do edifício garagem do aeroporto de Galeão no Rio de Janeiro (RJ) (figura 2.15), que apresenta vãos de até 16 m.



Figura 2.13. Le Coie Hotel, Reino Unido (fonte: www.bdkarchitects.com)



Figura 2.14. Centro Administrativo do Distrito Federal (fonte: Apresentação BubbleDeck®)



Figura 2.15. Construção Edifício Garagem Galeão - Rio de Janeiro (RJ) (fonte: Apresentação BubbleDeck®)

Algumas das vantagens apresentadas nesse sistema construtivo são:

- Liberdade nos projetos – leiautes flexíveis que facilmente se adaptam aos leiautes curvos e irregulares;
- Redução do peso próprio, o que permite uma redução do carregamento nas fundações;
- Permite a utilização de grandes vãos, até 50% maiores do que em estruturas tradicionais;
- Eliminação de vigas;
- Atenuação do nível de ruído entre pavimentos, já que o material inerte apresenta melhor isolamento acústico que o concreto;
- Condutibilidade térmica reduzida, já que o material inerte apresenta melhor isolamento térmico que o concreto;
- As instalações podem ser embutidas na laje e, pela característica de ser laje lisa, proporciona ganho expressivo de pé-direito;

Normalmente, essas lajes são dimensionadas pelos métodos convencionais para lajes lisas maciças, em que, considera-se a redução da carga intrínseca. As partes maciças da laje são definidas a partir da capacidade de suporte de carga cortante sem a utilização de armadura para resistir aos esforços de cisalhamento. As dimensões das esferas e o espaçamento entre elas são variáveis. A flexibilidade resultante desse método garante aos módulos uma adaptação fácil para qualquer tipo de piso, e a laje pode acomodar tubos e partes de instalações. Além disso, podem ser incluídas aberturas, mesmo após a conclusão da laje.

2.4.1 RESULTADO DE ENSAIOS E ESTUDOS

Foram realizados diversos estudos e ensaios na Europa que mostram a eficiência da tecnologia. O teste de resistência a flexão e deformação mostra uma deformabilidade inferior à deformação esperada, até 65%. A tabela a seguir foi extraída de um relatório de ensaio da *Technical University of Darmstadt* / Alemanha, e mostra uma comparação entre algumas propriedades da laje BubbleDeck® e uma laje maciça

Tabela 2.1. Comparação entre laje BubbleDeck® e laje lisa pelo teste de resistência a flexão

Em % de laje lisa	Bubbledeck x Laje Lisa		
	Mesma resistência	Mesma rigidez a flexão	Mesmo volume de concreto
Resistência	100	105	150
Rigidez a Flexão	87	100	300
Volume de concreto	66	69	100

Como podemos observar na tabela 2.1, para uma laje BubbleDeck® com a mesma resistência da laje lisa, apresentou 87% do valor da rigidez à flexão da laje lisa e seu volume de concreto foi reduzido para 66% em relação a mesma laje lisa. Para uma laje BubbleDeck® e uma laje lisa com mesmo valor de rigidez a flexão, a BubbleDeck® apresentou um aumento de 5% na resistência e seu volume reduzido a 69%. E para um mesmo volume de concreto para as duas lajes, a BubbleDeck® apresentou uma aumento de 50% na resistência e 200% na rigidez à flexão.

Relatórios da *Eindhoven University of Technology*, Países Baixos acerca de ensaios de cisalhamento e punção mostram que a laje BubbleDeck® é capaz de resistir a 81% dos esforços de cisalhamento e 91% da resistência à punção em relação a uma laje lisa maciça de mesma espessura. Essa resistência ao cortante/punção é ainda maior do que o antecipado. Isto indica uma influência positiva das esferas. Além disso, a experiência prática mostra um efeito positivo no processo de concretagem: as esferas causam um efeito parecido com o de aditivos plastificantes. Isso pelo fato de que a resistência ao cisalhamento depende somente da massa efetiva de concreto. Fatores como ancoragem e fluência não apresentaram diferenças significativas em relação as lajes lisas comuns, de acordo com a *Eindhoven University of Technology*.

Foram realizados também ensaios de resistência a incêndios. Testes realizados por laboratórios indica que as lajes BubbleDeck® possui resistência térmica de 17% a 39% maior que uma laje lisa de mesma espessura. Foram testadas lajes de 33 cm onde o TRRF (Tempo Requerido de Resistência ao Fogo) foi de 60 minutos, com cobrimento de concreto de 2 cm. Para uma laje de 23 cm com cobrimento de 3,5 cm, o TRRF foi de 120 minutos. Em relação a pressão interna do ar aquecido dentro dos módulos, constatou-se que ela não influencia ou impõe perigo a construção. A tabela a seguir mostra o cobrimento mínimo para a armadura inferior em função do TRRF:

Tabela 2.2. Cobrimento mínimo para a armadura inferior em função do TRRF

Tensão no aço	Utilização do aço	TRRF				
		30	60	90	120	180
190	66%	17 mm	17 mm	17 mm	17 mm	--
286	100%	17 mm	29 mm	35 mm	42 mm	55 mm

Com relação ao isolamento acústico, a laje BubbleDeck® mostrou desempenho semelhante a laje lisa e alveolar. Foram analisados desempenho em relação a ruídos de impacto, ruídos aéreos e pressão sonora de impacto.

Outro estudo realizado foi o de comparação de custo. No Relatório da *AEC Consulting Engineers Ltd.* / Professor M.P. Nielsen – *The Technical University of Denmark* – Anexo H2, foram feitas comparações entre lajes BubbleDeck® e lajes maciças em que somente as diferenças de materiais relativos as lajes foram consideradas (vantagens no projeto do edifício e no processo construtivo não são levados em consideração). Para uma mesma quantidade de aço e concreto, a laje BubbleDeck® apresenta vãos 40% maiores e é ainda 15% mais barata. Já para o mesmo vão, a laje em estudo reduz a quantidade de concreto em 33% e o preço em 30%.

2.5 LAJES ALVEOLARES

As lajes alveolares são originais da Alemanha, e representam um dos mais populares elementos pré-fabricados no mundo. São de grande versatilidade, podendo ser aplicadas em qualquer tipo de sistema construtivo (convencional, pré-fabricado, metálico, alvenaria estrutural e outros), para fim habitacional, comercial, industrial e de estacionamento, empregadas tanto para execução de pisos, sendo o mais comum, como na forma de fechamentos ou painéis.

A laje alveolar é constituída de painéis de concreto protendido que possuem seção transversal com altura constante e alvéolos longitudinais, responsáveis pela redução do peso da peça. Diferentemente dos sistemas anteriores onde os vazios são determinados por módulos ociosos, os vazios longitudinais desse sistema são obtidos através de formas, que podem variar de geometria e tamanho de acordo com o fabricante.

Pode-se listar as principais vantagens do sistema de Lajes Alveolares a redução da quantidade de concreto; redução do peso próprio da estrutura; redução de serviço na obra; facilidade no transporte; possibilidade de vencer maiores vãos.

Em geral é utilizado o sistema de protensão com a colocação da armadura ativa aderente na mesa inferior, sendo os cabos de protensão posicionados na direção longitudinal da laje e

também na mesa superior. O concreto utilizado para a produção das lajes é executado com cimentos de alta resistência inicial. Devido à inexistência de armadura para resistir à força cortante e para solicitações na direção transversal, estes esforços são suportados apenas pela resistência à tração do concreto (EL DEBS, 2000).

O método construtivo das lajes alveolares pode ser dividido em pequenas etapas. Primeiramente as cordoalhas são posicionadas na pista de protensão e estiradas por macaco de protensão. Após obter a força de protensão desejada, os tubos de aço são posicionados na pista para a formação dos alvéolos na laje. Entre os tubos são posicionadas as barras de aço guias, que matem os espaçamentos entre os tubos. Em seguida é realizada a concretagem da laje. Após o concreto ser distribuído e adensado é feito o acabamento superficial da laje para o recebimento da capa e, por conseguinte, a cura. Depois de encerrada a etapa da cura, o concreto já possui resistência suficiente para resistir à protensão gerada pelo corte das cordoalhas. Finalizando a sua produção, as lajes são transportadas para o local da obra, onde são içadas e posicionadas, por guindaste, no local definitivo de montagem. As figuras 2.16 e 2.17 mostram o içamento dos painéis, e o posicionamento dos módulos na mesa de concretagem, respectivamente.



Figura 2.16. Transporte de painel de Laje Alveolar (fonte: www.protensul.com.br)



Figura 2.17. Posicionamento dos moldes dos vazios das Lajes Alveolares (fonte: MIGLIORE, Gabriel, Dimensionamento e utilização de laje alveolar protendida)

3 MÉTODOS ANALÍTICOS DE CÁLCULO À FLEXÃO DE LAJES LISAS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O cálculo dos esforços solicitantes analiticamente, pela teoria da elasticidade, pode ser realizado utilizando processos práticos simplificados, desde que as estruturas se apresentem geometricamente bem definidas (pilares espaçados de modo regular, com vãos de mesma ordem de grandeza nas duas direções) e com predominância de carregamento uniformemente distribuído.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, lajes lisas são lajes apoiadas diretamente em pilares, sem capitéis. Se os pilares possuírem um aumento da seção transversal junto a ligação com a laje, dizemos que possui um capitel, que tem como principal função combater os esforços de cisalhamento, combatendo assim o fenômeno de punção. Lajes lisas com capitéis são chamadas de lajes-cogumelo. Com o mesmo intuito dos capitéis, pode-se também aumentar a espessura da laje na região da ligação com os pilares, esse engrossamento é denominado ábaco.

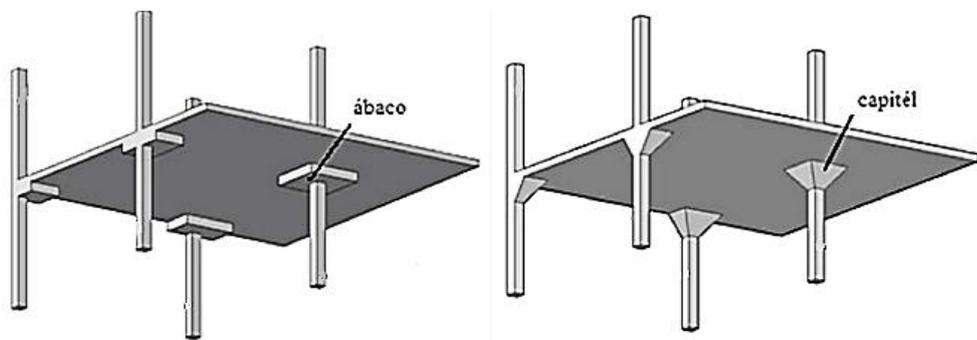


Figura 3.1. Diferença entre ábaco e capitel em lajes cogumelos [NETO, A.F.L. 2012]

Existem diversos métodos de determinar esforços de lajes lisas que seguem duas linhas de teoria a Teoria da Plasticidade ou a Teoria da Elasticidade. Nesse trabalho serão analisados apenas os principais métodos elásticos de dimensionamento. O método elástico, também conhecido como método clássico, baseia-se na então já dita Teoria da Elasticidade e admite-se que o material seja homogêneo, isótropo e tenha comportamento linear. Como em condições de serviço as lajes se comportam elasticamente, é indispensável sua utilização para a verificação dos estados limites de serviço. Em termos de cálculo, o cálculo elástico de lajes de concreto

armado baseia-se na teoria das placas delgadas, e teve origem com Lagrange que, em 1816, estabeleceu a equação diferencial da deformada elástica de uma placa delgada.

Segundo a teoria das placas delgadas, uma placa delgada, submetida a carga normais em seu plano, apresenta deformada definida pela função $w(x,y)$, que determina os deslocamentos verticais dos pontos (x,y) . Admite-se que os pontos no plano só sofram deslocamentos verticais e que as retas normais ao plano permaneçam normais em relação à deslocada.

Expressando as tensões e os esforços que aparecem na placa em função dos deslocamentos verticais w , e impondo-se condições de equilíbrio em relação aos eixos x , y e z , obtém-se a equação diferencial das placas elásticas, ou de Lagrange:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{2\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{D} \quad (\text{Equação 3.1})$$

sendo,

p – a carga total distribuída uniformemente

D – a rigidez à flexão da placa, e vale:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu)^2} \quad (\text{Equação 3.2})$$

sendo,

E – o módulo de deformação longitudinal

h – espessura da placa.

ν – o coeficiente de Poisson.

Esse cálculo só é válido para placas circulares, mas pode-se obter soluções aproximadas com a utilização das séries de Fourier para certos tipos de placas, ou por integração numérica. Porém, essas soluções não são nada práticas em termos de cálculos manuais. Nos itens que se seguem serão abordados os métodos dos pórticos equivalentes, o método direto e a descrição da utilização do *software* de cálculo estrutural CAD/TQS.

3.2 MÉTODO DIRETO

O Método Direto é previsto na norma ACI 318, (2014), e encontra-se também em MONTROYA (1991). Esse método consiste na determinação dos esforços de flexão em um painel de forma bem simples e rápida, desconsiderando as dimensões e as cargas dos painéis adjacentes. O método de cálculo dos momentos na laje envolve três passos básicos. O primeiro consiste na determinação de um momento total M_0 , calculado para cada painel, nas duas dimensões. O segundo em transformar o momento M_0 em três: dois negativos nos pontos, nas seções de apoio, e um positivo no meio do vão. E por último, distribuir os momentos negativos e positivos em faixas de laje que contêm os pilares e para as faixas centrais de cada painel.

3.2.1 DEFINIÇÕES

Antes de prosseguirmos, devemos definir alguns termos necessários para a compreensão do método.

Painel – região delimitada pelas retas que ligam os centros dos pilares alinhados (figura 3.3);

Faixas laterais – são faixas constituídas de duas partes, uma de cada lado da reta que delimita dois painéis adjacentes, cada uma com largura igual ou menor que: $0,25 l_1$ ou $0,25 l_2$. (figura 3.4);

Faixas centrais – faixas delimitadas por duas faixas centrais (figura 3.5).

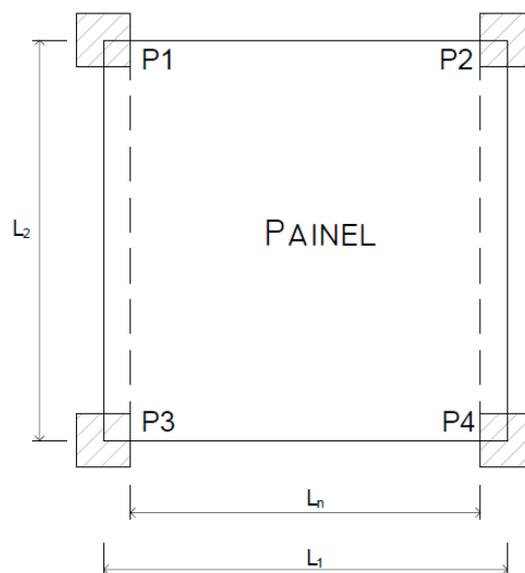


Figura 3.2. Esquema representativo de um painel de laje e seus comprimentos de vãos

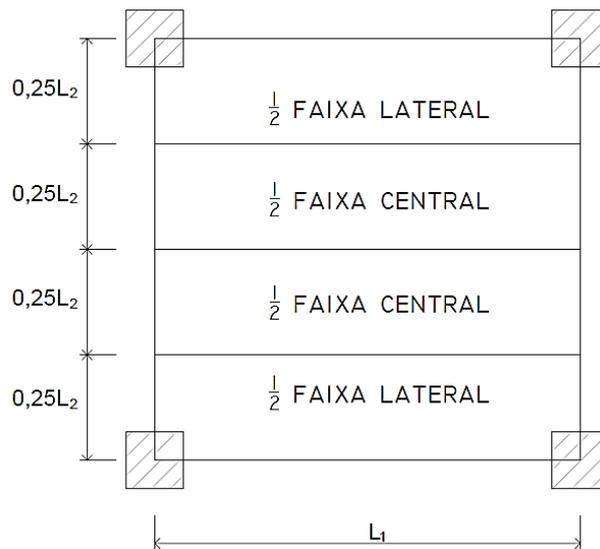


Figura 3.3. Divisão da laje em faixas laterais

Faixas de projeto – faixas delimitadas pelos eixos de simetria de dois painéis, sendo formadas por uma faixa lateral e duas meias faixas. Quando se tem vãos adjacentes e paralelos à borda, elas serão delimitadas pelo eixo de simetria do painel da extremidade e pela borda (figura 3.5).

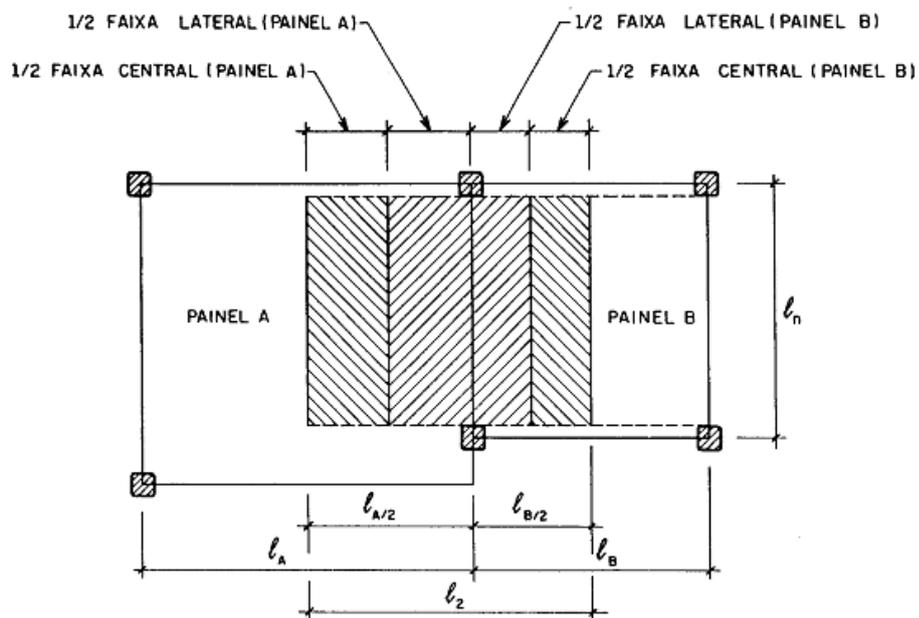


Figura 3.4. Divisão de faixas para painéis adjacentes

3.2.2 LIMITAÇÕES DO MÉTODO DIRETO

Por se tratar de um método aproximado, há uma série de limitações para sua aplicação: [CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M, 2013]

- Deve haver ao menos três vãos em cada direção; com apenas dois vãos contínuos o valor dos momentos negativos em apoios inferiores é maior.
- Os painéis devem ser retangulares, com relação entre vão maior e menor, medidos de centro a centro dos pilares, não maior que 2; caso contrário a laje trabalhará essencialmente em uma direção, situação para a qual o método não se aplica.
- Os comprimentos dos sucessivos vãos em cada direção não pode diferir em mais que um terço do maior; de outro modo há a possibilidade de ocorrência momentos negativos em regiões sem armadura para este fim.
- Os pilares podem ser deslocados no máximo 10% do vão, na direção do deslocamento, em relação ao eixo central dos sucessivos pilares.
- Todas as ações devem ser somente devidas à gravidade, e uniformemente distribuídas em todo painel; ações laterais requerem análise de pórtico.

3.2.3 MOMENTO TOTAL DE REFERÊNCIA PARA UM VÃO

O momento total de referência M_0 para um vão deve ser determinado para um carregamento total em uma faixa de largura l_2 e é dado por:

$$M_0 = \frac{(p \cdot l_0) \cdot l_n^2}{8} \quad (\text{Equação 3.3})$$

sendo o valor de l_n não deve ser inferior a $0,65 \cdot l_1$.

Pilares com formatos circular ou poligonal devem ser tratados como pilares quadrados de mesma área, chamados de pilares equivalentes, como pode ser visto na figura 3.6 a seguir.

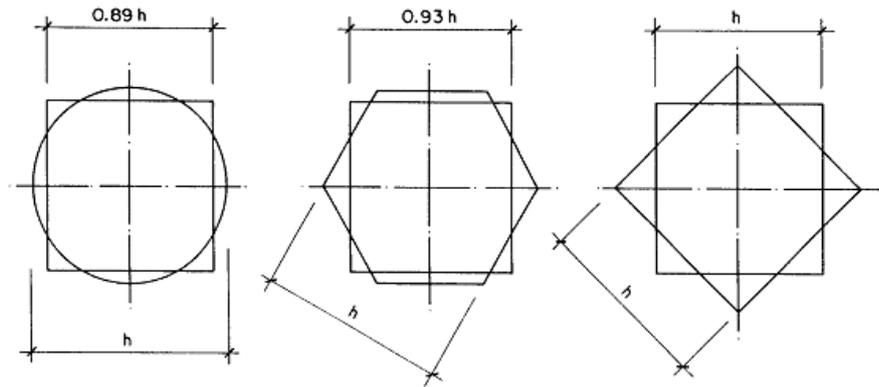


Figura 3.5. Exemplos de seções quadradas equivalentes para pilares não retangulares

3.2.4 MOMENTOS DE REFERÊNCIA POSITIVOS E NEGATIVOS

Os momentos de referência positivos no meio do vão M_C (figura 3.7) e os momentos de referência negativos M_A e M_B atuantes nas faces dos pilares, são obtidos a partir do momento de referência M_0 . Para o caso em que não há vigas de borda os valores dos momentos são os seguintes.

a) Vãos internos

Momentos de referência positivos:

$$M_C = 0,35 \cdot M_0 \quad (\text{Equação 3.4})$$

Momentos de referência negativos:

$$M_A = M_B = 0,65 \cdot M_0 \quad (\text{Equação 3.5})$$

b) Vãos externos

Momento de referência negativo no pilar externo:

$$M_A = 0,26 \cdot M_0 \quad (\text{Equação 3.6})$$

Momento de referência positivo:

$$M_B = 0,52.M_0 \quad (\text{Equação 3.7})$$

Momento de referência negativo no pilar interno:

$$M_C = 0,70.M_0 \quad (\text{Equação 3.8})$$

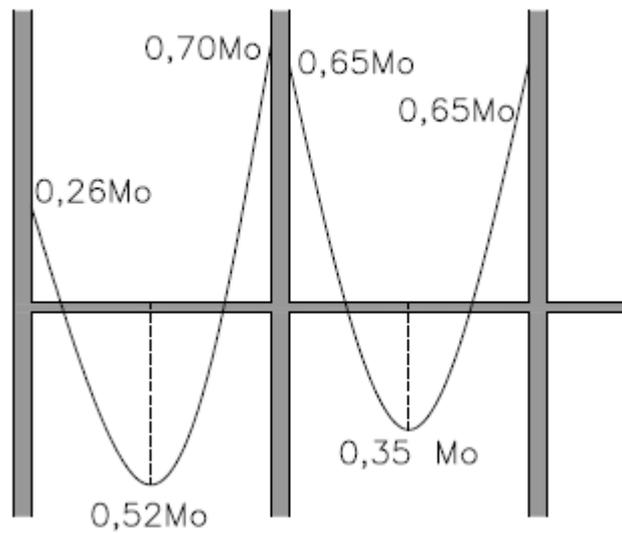


Figura 3.6. Distribuição do momento de referência para lajes lisas sem viga de borda

Para o caso em que há vigas de borda os valores dos momentos são os seguintes.

a) Vãos internos

Momentos de referência positivos:

$$M_C = 0,35.M_0 \quad (\text{Equação 3.9})$$

Momentos de referência negativos:

$$M_A = M_B = 0,65.M_0 \quad (\text{Equação 3.10})$$

b) Vãos externos

Momento de referência negativo no pilar externo:

$$M_A = 0,26.M_0 \quad (\text{Equação 3.11})$$

Momento de referência positivo:

$$M_B = 0,52. M_0 \quad (\text{Equação 3.12})$$

Momento de referência negativo no pilar interno:

$$M_C = 0,70. M_0 \quad (\text{Equação 3.13})$$

$$M_B = 0,52. M_0 \quad (\text{Equação 3.14})$$

Momento de referência negativo no pilar interno:

$$M_C = 0,70. M_0 \quad (\text{Equação 3.15})$$

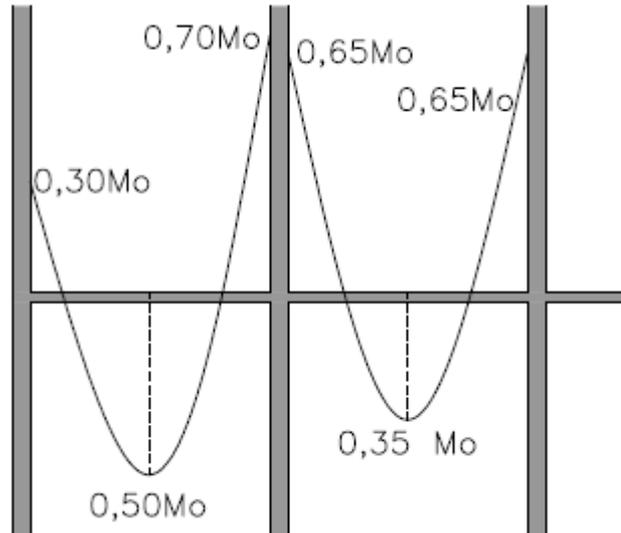


Figura 3.7. Momentos de referência no pórtico equivalente

3.2.5 DISTRIBUIÇÃO DOS MOMENTOS ENTRE AS FAIXAS

É necessário agora distribuir os momentos de referência positivos e negativos, que atuam nas seções A, B e C (figura 3.7) entre as faixas dos pilares e as faixas centrais.

a) Momentos Negativos

Para pilares internos, 75% do momento negativo serão absorvidos pela faixa dos pilares e os 25% restantes serão divididos pelas duas meias faixas centrais adjacentes a ela.

Para pilares de canto ou de borda, o momento negativo será totalmente absorvido pela faixa de pilares.

b) Momentos Positivos

Para o momento positivo, independentemente de ser vão central ou externo, 60% do seu valor serão absorvidos pela faixa dos pilares enquanto 40% que restaram serão divididos entre as duas meias faixas centrais.

3.3 MÉTODO DO PÓRTICO EQUIVALENTE

O método dos pórticos múltiplos consiste em se supor que a estrutura está dividida, em cada uma das direções, em uma série de pórticos múltiplos, constituídos por um conjunto de colunas de barras horizontais, cujas inércias serão iguais às da região da laje limitada pela metade da distância entre duas linhas de pilares. Os pórticos múltiplos correspondentes a cada direção serão calculados independentemente uns dos outros, com a carga total atuando e de acordo com hipóteses de arranjos de cargas, que levem à obtenção de momentos positivos e negativos nas faixas. Os momentos encontrados são utilizados no dimensionamento do estado limite último.

Devem-se ser cuidadosamente estudadas as ligações das lajes com os pilares, com especial atenção aos casos em que não haja simetria de forma ou de carregamento da laje em relação ao apoio. Recomenda-se que a média das forças axiais obtidas em um pilar pertencente a dois pórticos distintos seja dividido por dois.

No caso de ações gravitacionais somente, pode-se admitir cada pórtico como apenas de um piso, com as extremidades dos pilares engastadas no pavimento superior e inferior. Pode-se ainda considerar os pilares simplesmente apoiados na metade da altura entre os pavimentos adjacentes.

Os momentos positivos e negativos nas seções críticas, obtidos do cálculo de cada pórtico devem ser distribuídos para as faixas dos pilares e centrais com os mesmos coeficientes adotados para o método direto.

Segundo o item 14.7.8 da ABNT NBR 6118:2014, a distribuição dos momentos, com os painéis divididos em quatro faixas iguais e os cantos correspondendo aos pilares, conforme indicado na figura 3.2, é feito da seguinte maneira:

- 45 % dos momentos positivos para as duas faixas internas;
- 27,5 % dos momentos positivos para cada uma das faixas externas;
- 25 % dos momentos negativos para as duas faixas internas;
- 37,5 % dos momentos negativos para cada uma das faixas externas.

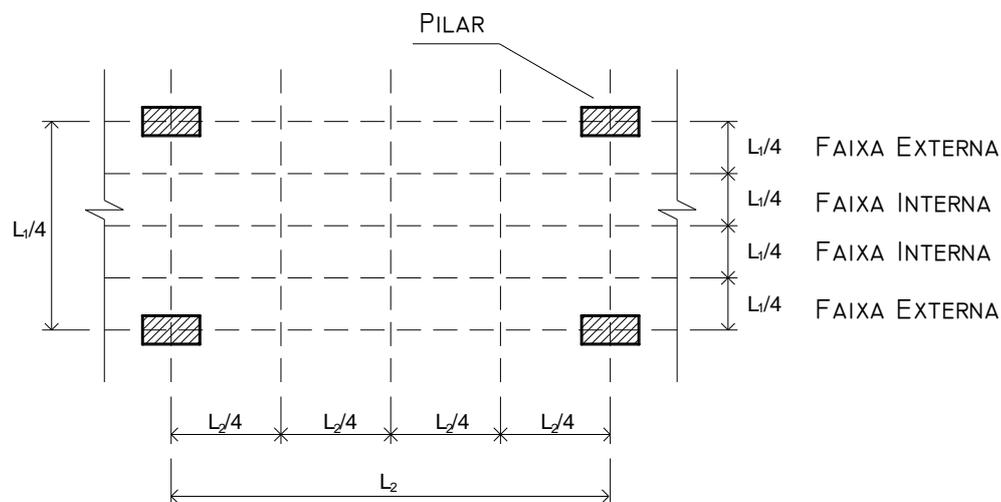


Figura 3.8. Desenho representativo da divisão da lajes em faixas

3.4 SOFTWARE DE CÁLCULO ESTRUTURAL CAD/TQS

O *software* CAD/TQS é um sistema computacional gráfico destinado à elaboração de projetos de estruturas de concreto armado, protendido e em alvenaria estrutural. O seu desenvolvimento é baseado nas normas técnicas de concreto armado e protendido, bem como

na metodologia usual de elaboração e representação de projetos estruturais empregadas pelas empresas brasileiras. O programa gera uma base de dados para a edificação utilizando o método da análise matricial de grelhas, gerenciando uma análise da estrutura, a transferência e o cálculo de esforços e o detalhamento de todos os elementos estruturais.

Nesse *software* o projeto pode ser realizado diretamente a partir do projeto arquitetônico, desde que nesse estejam definidos as dimensões e a locação dos elementos estruturais. Além disso, é necessário determinar os carregamentos verticais e horizontais atuantes na edificação.

Os sistemas CAD/TQS trata dos seguintes elementos: pilar (retangular, em “L”, em “U”, circular ou com formato qualquer), pilar-parede (formato qualquer), pilar inclinado, pilarete, pilar com pé-direito duplo, tirante, pilar com variação de seção, viga (reta ou curva), viga de transição, viga inclinada, viga-faixa (imersa no interior de uma laje), laje maciça (convencional apoiada em vigas), nervurada (retangular ou trapezoidal), laje treliçada, pré-moldada, laje lisa (apoiada diretamente em pilares, cogumelo ou protendida), furo e recorte em qualquer ponto do pavimento, capital, escada, blocos e sapatas. Esse sistema oferece a possibilidade da adoção de critérios de projeto que permitem a adequação do cálculo de esforços solicitantes e detalhamento final dos desenhos de armação à prática usual de projeto. Além disso, os elementos gerados após o processamento podem ser alterados individualmente, tais como alteração de dados e armaduras geradas pela análise de grelhas, vigas e pilares. Os principais critérios e parâmetros adotados para o dimensionamento que dizem respeito às lajes lisas com vazios para o caso estudado nesse trabalho estão relacionados no capítulo seguinte.

4 CONSIDERAÇÕES DE CÁLCULO PARA LAJES BUBBLEDECK®

Devido à forma circular dos vazios, que permite que as forças sejam transferidas dentro da laje de forma homogênea, é possível calcular uma laje do tipo BubbleDeck® considerando-a uma laje maciça lisa. Assim, é possível utilizar os mesmos métodos de cálculo à flexão de lajes lisas citados nos capítulos anteriores, para realizar, em seguida, o dimensionamento das lajes utilizando a tecnologia BubbleDeck®.

Entretanto, existem algumas considerações de cálculo que devem ser adotadas neste dimensionamento. Uma dessas considerações é o valor da linha neutra da laje BubbleDeck®, que será diferente de uma laje lisa comum, devido a inserção de vazios no seu interior. Três parâmetros são diretamente influenciados pela posição da linha neutra da laje e deve ser levado em conta no dimensionamento. São eles: peso próprio, deflexão e resistência ao cisalhamento.

Segundo o fabricante, como a laje BubbleDeck® é uma laje biaxial, o projeto será beneficiado caso se utilizem as possibilidades desse tipo de laje. A utilização de momento de engaste pelo posicionamento de aço adicional sobre as colunas (e paredes estruturais se a laje tiver apoio contínuo) resultará em um melhor comportamento estático, levando a redução do consumo geral de aço, servindo também como uma forte ferramenta na redução e controle da deflexão. Como consequência, o projeto ótimo para soluções BubbleDeck®, será o de lajes com vãos contínuos, que é o caso do projeto em estudo.

4.1 PESO PRÓPRIO

Segundo o fabricante, o peso próprio de uma laje BubbleDeck® é reduzido cerca de 65% do peso de uma laje maciça com a mesma espessura. A inserção dos módulos de vazios, ocupando o lugar que seria ocupado por concreto acaba por acarretar essa redução no peso próprio.

4.2 DEFLEXÃO (FLECHAS)

No cálculo da deflexão deve-se utilizar um valor de rigidez a flexão igual a 0,9 do coeficiente que seria utilizado em uma laje lisa ou cogumelo de mesma altura. Ou seja, um fator de 0,9 no EI (módulo de elasticidade x momento de inércia).

4.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Como a resistência ao cortante de uma laje é diretamente proporcional à quantidade de concreto, esta resistência em lajes BubbleDeck® terá seu valor minorado comparado a uma laje de mesma espessura. Utiliza-se um fator de minoração de 0,6 na resistência ao cortante da laje, o que é uma redução expressiva. Por isso, em áreas onde há esforços cisalhantes muito altos não são inseridas as esferas da BubbleDeck®, mantendo assim a área sólida e inserindo-se a armadura de cisalhamento conforme a necessidade. Exemplos de situações onde não se colocariam os módulos seriam em áreas próximas ao perímetro de pilares e de paredes estruturais.

5 PROJETO ESTRUTURAL

Nos capítulos seguintes é apresentado o dimensionamento da estrutura de uma edificação utilizando o método construtivo de lajes BubbleDeck® e o método construtivo de lajes lisas maciças, buscando, em seguida, fazer um comparativo entre esses resultados. Para realizar esse dimensionamento serão utilizados os métodos de cálculo aqui citados e o programa de cálculo estrutural CAD/TQS.

5.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA EDIFICAÇÃO

O edifício a ser dimensionado consta de três pavimentos-tipo e um térreo com pilotis. Será utilizado alvenaria de blocos cerâmicos, em que as paredes externas possuem 20 cm acabadas e as internas 15 cm. A planta de arquitetura tipo é apresentada na figura 5.1, a seguir. O projeto será realizado utilizando-se o sistema de lajes lisas maciças e o sistema de lajes BubbleDeck®.

Os pilares foram lançados na planta de arquitetura, de forma que apresentassem vãos de 7 m entre si, já que a utilização de lajes BubbleDeck® se torna eficaz para vãos a partir de, pelo menos, 6 m de extensão. Para tanto, foram observados alguns aspectos, tais como: evitar que a resistência global da estrutura dependa de um número reduzido de peças e, dessa forma, que existam peças excessivamente solicitadas em relação às demais; buscar o menor trajeto possível para as cargas; evitar peças excessivamente delgadas, já que causam dificuldades para a disposição das armaduras, para a concretagem e para o adensamento (vibração) do concreto; evitar interligar peças delgadas e espessas, afim de prevenir zonas de transição com tensões internas elevadas, provocadas por retração e efeitos de temperatura.

5.2 PRÉ-DIMENSIONAMENTO

A fim de se obter a planta de formas a ser utilizada no dimensionamento, foi realizado pré-dimensionamento dos elementos estruturais, lajes e pilares.

O tipo apropriado de laje BubbleDeck® é dimensionado de acordo com a configuração da edificação, o tamanho dos vãos entre apoios e o carregamento aplicado. A tabela abaixo é apresentada pelo fabricante e traz vãos de referência para pré-dimensionamento.

Tabela 5.1. Tipos de Lajes BubbleDeck®

Tipo	Espessura da Laje (cobrimento ajustável) (mm)	Diâmetro das Esferas (mm)	Vãos (Internos-com continuidade entre vãos) (m)	Vão (Externos-sem continuidade entre vãos) (m)	Comprimento máximo em balanço (m)	Massa de laje totalmente concretada (kg/m³)	Consumo de concreto (m³/m²)
BD230	230 (225-280)	Φ 180	6 - 9	5 - 6	≤ 2,5	370	0,15
BD285	285 (280-330)	Φ 225	7 - 11	6 - 8	≤ 3,0	460	0,19
BD340	340 (330-385)	Φ 270	9 - 13	7 - 10	≤ 3,5	550	0,23
BD395	395 (385-435)	Φ 315	10 - 15	8 - 11	≤ 4,0	640	0,25
BD450	450 (435-500)	Φ 360	11 - 17	9 - 12	≤ 4,5	730	0,31

Baseado na tabela 5.1, o tipo escolhido de laje BubbleDeck® será o BD285, com a espessura da laje de 28 cm e diâmetro das esferas de 22,5 cm, já que os vãos entre pilares do edifício em estudo são de 7 m. A espessura da laje lisa maciça será discutida a seguir, a altura da mesma será dimensionada de forma que apresente uma flecha equivalente à laje BD285.

O pré-dimensionamento dos pilares é feito estimando-se a carga atuante em cada um deles, por exemplo, através do processo das áreas de influência. Este processo consiste em dividir a área total do pavimento em áreas de influência, relativas a cada pilar e, a partir daí, estimar a carga que eles irão absorver.

A área de influência de cada pilar pode ser obtida dividindo-se as distâncias entre seus eixos em intervalos que variam entre $0,45\ell$ e $0,55\ell$, dependendo da posição do pilar na estrutura, ou seja:

- $0,45\ell$: pilar de extremidade e de canto, na direção da sua menor dimensão;
- $0,55\ell$: complementos dos vãos do caso anterior;
- $0,50\ell$: pilar central.

Convém salientar que quanto maior for a uniformidade no alinhamento dos pilares e na distribuição dos vãos e das cargas, maior será a precisão dos resultados obtidos. Portanto, para este trabalho esse método apresenta resultados satisfatórios.

Após avaliar a força nos pilares pelo processo das áreas de influência, é determinado o coeficiente de majoração da força normal (α) que leva em conta as excentricidades da carga, sendo considerados os valores:

- $\alpha = 1,3$ → pilares internos ou de extremidade, na direção da maior dimensão;
- $\alpha = 1,5$ → pilares de extremidade, na direção da menor dimensão;

$\alpha = 1,8 \rightarrow$ pilares de canto.

Após análise das áreas de influencia, foram adotados pilares internos com dimensões 40 x 70 cm e externos 20 x 50 cm, visto que os pilares internos recebem maior parcela de carregamento. Por fim, optou-se por utilizar viga de bordo em todos os pavimentos afim de se adquirir maior estabilidade global para a projeto estrutural.

5.3 PLANTA DE FORMAS

Após realizar o pré-dimensionamento dos elementos, apresenta-se a planta de formas do edifício a ser estudado utilizando os métodos construtivos de lajes lisas maciças e lajes lisas com vazios, no caso, lajes BubbleDeck[®]. As plantas de formas obtidas encontram-se nas figuras 5.2 e 5.3, as plantas correspondem ao dimensionamento utilizando lajes BubbleDeck[®].

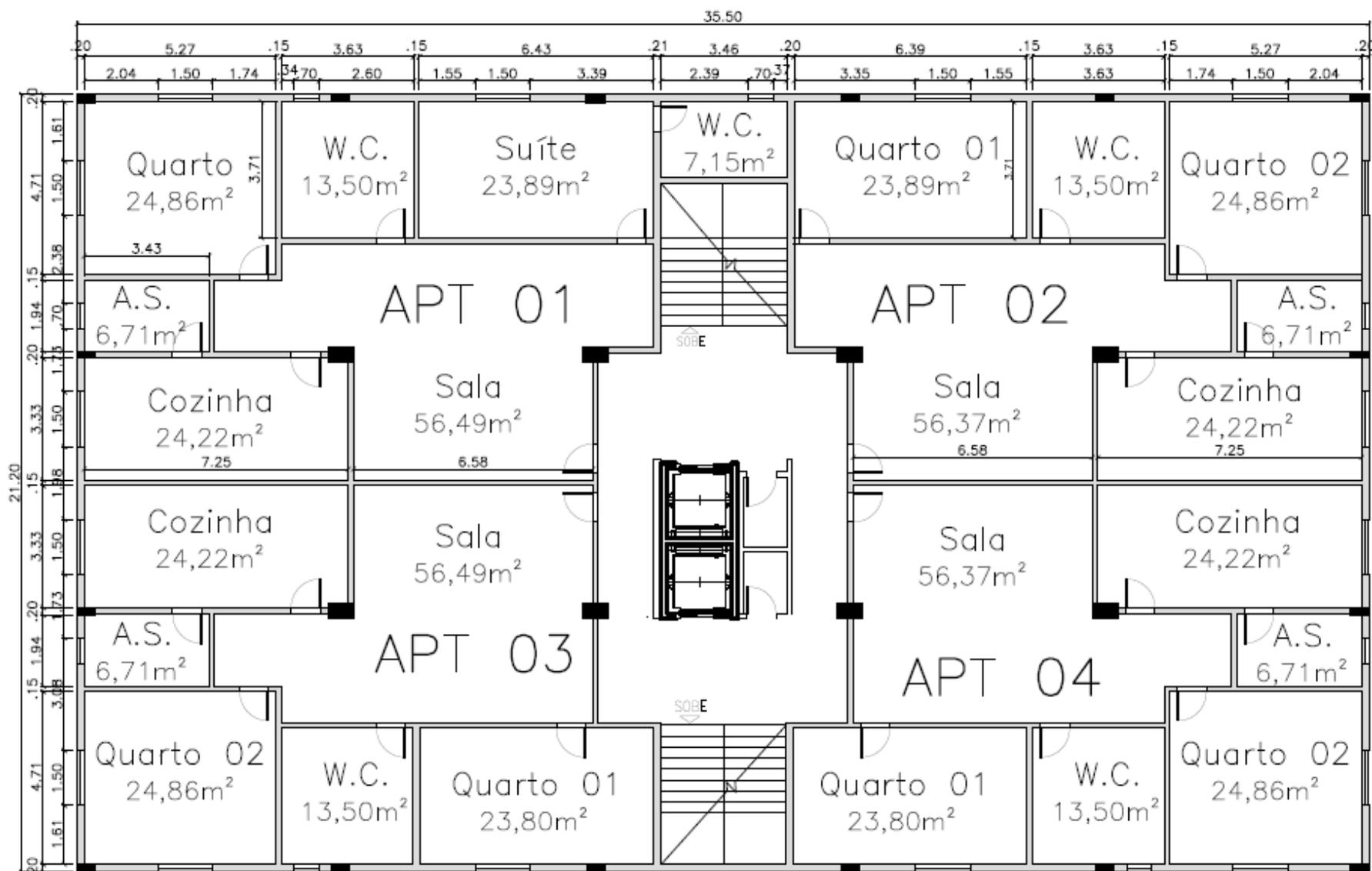


Figura 5.1. Planta de Arquitetura do pavimento tipo, sem escala

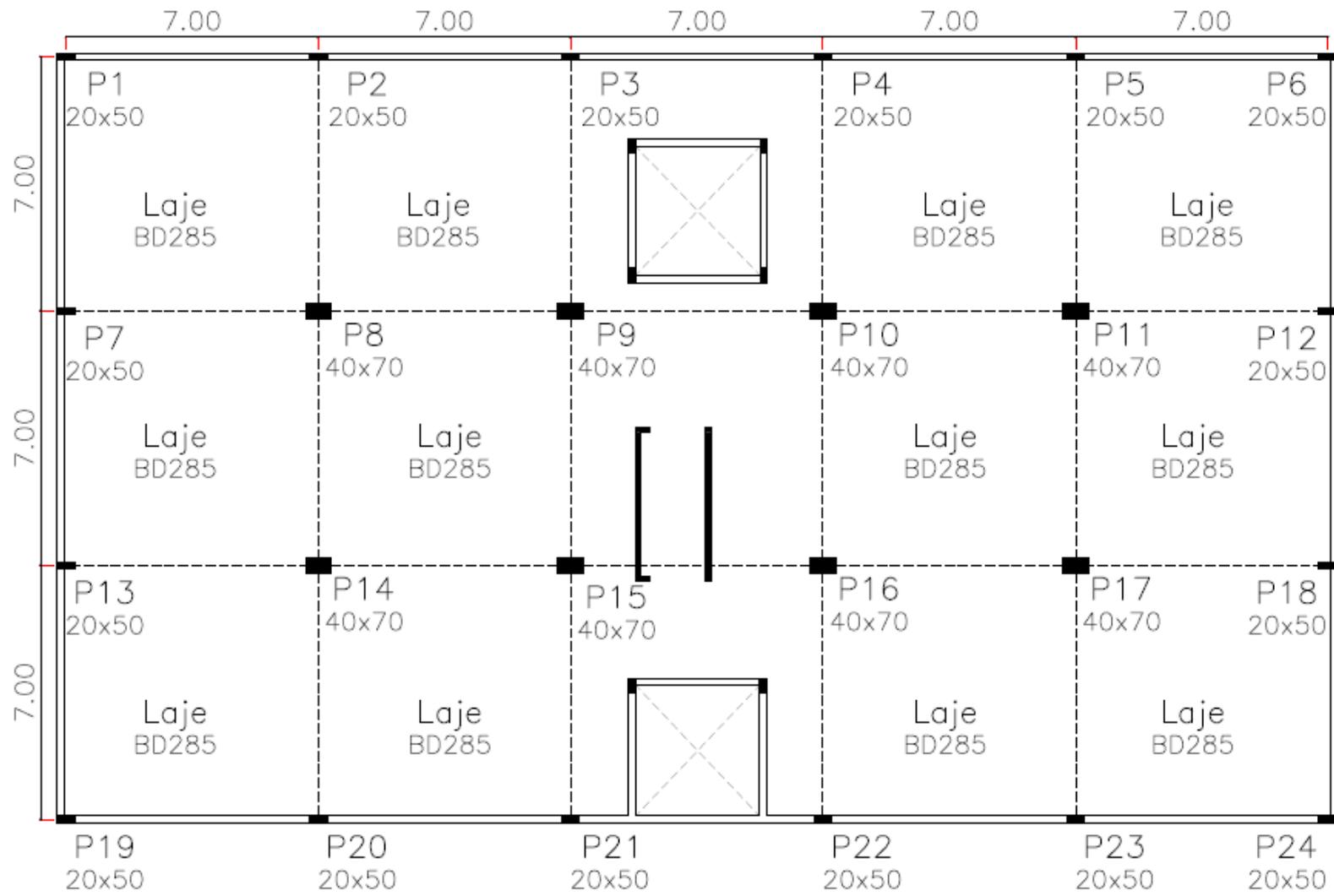


Figura 5.2. Planta de formas tipo para lajes BubbleDeck®

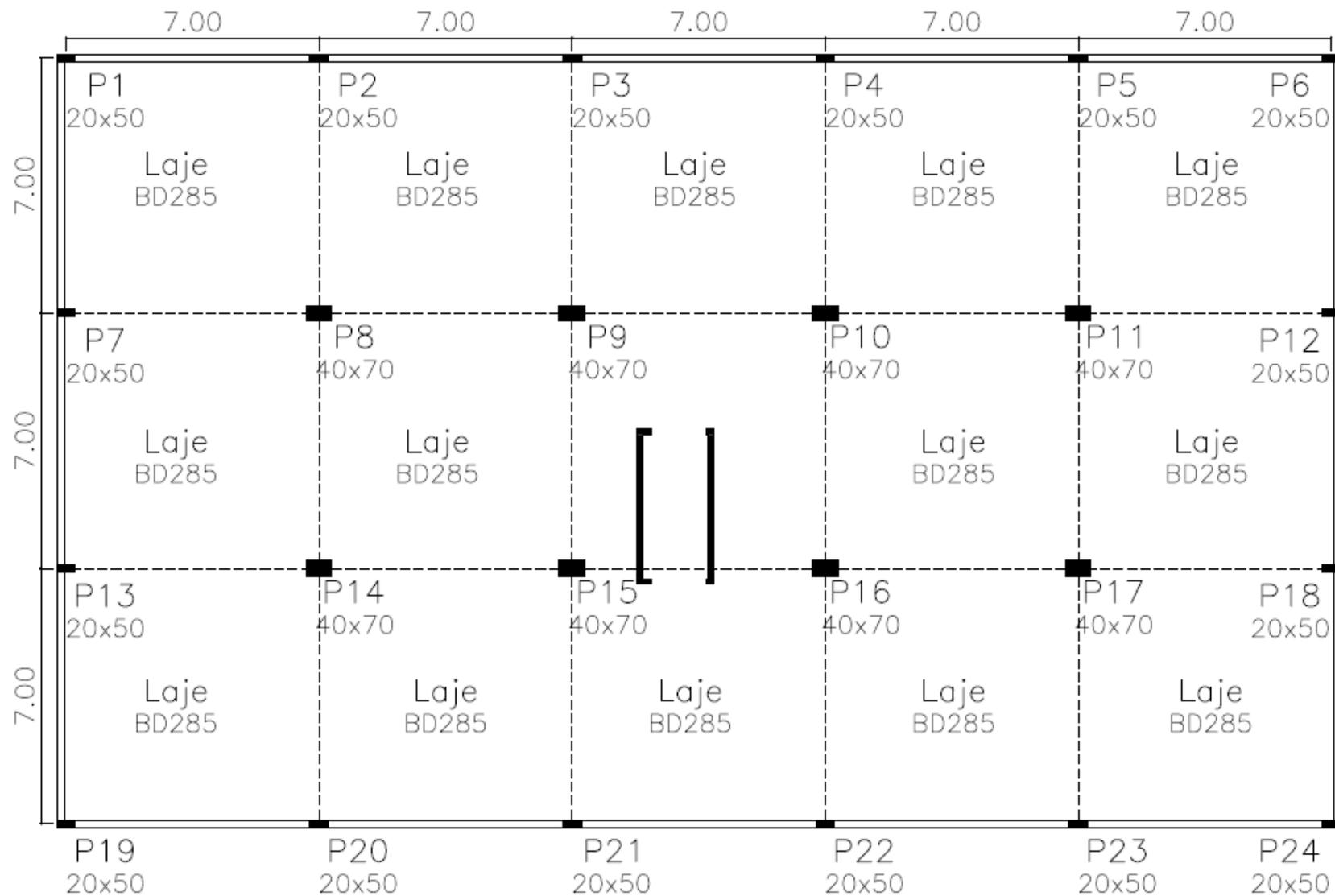


Figura 5.3. Planta de formas de cobertura para lajes BubbleDeck®

6 RESULTADOS LAJES BUBBLEDECK®

6.1 DIMENSIONAMENTO UTILIZANDO O SOFTWARE CAD/TQS.

Para se viabilizar o uso do *software* CAD/TQS para calcular uma laje do tipo Bubbledeck®, é necessário que se desabilite o cálculo automático do peso próprio da estrutura, uma vez que as lajes Bubbledeck® terão peso próprio reduzido. O peso próprio da mesma será calculado retirando-se o peso correspondente do volume retirado de concreto, que por sua vez é o volume das somas de todos os módulos esféricos de Bubbledeck® inseridos nas lajes. Esse carregamento entrará como carga permanente da estrutura.

6.1.1 CÁLCULO DO PESO PRÓPRIO DAS LAJES BUBBLEDECK®

Para calcular o peso próprio de uma laje Bubbledeck® basta calcular o peso próprio de uma laje lisa com mesma espessura e retirar o volume de concreto correspondente ao volume dos módulos esféricos da Bubbledeck® nela presente. Para calcular a quantidade de módulos da laje devem-se considerar os espaçamentos entre as Bubbledeck® de um mesmo painel, o espaçamento entre os painéis adjacentes e a região crítica em volta do pilar.

Foram utilizados quatro tipos de painéis de lajes Bubbledeck®, com dimensões diferentes. Os painéis medem 7,1 m x 3,5 m, 7,0 m x 3,5 m, 7,1 x 3,75 m e 7,0 x 3,75 m. O espaçamento entre as Bubbledeck® de cada painel é de 2,5 cm e o espaçamento das Bubbledeck® para as bordas dos painéis variam de 12,5 cm a 17,5 cm. Em regiões do contorno do pilar não há módulos esféricos, devido à região crítica de punção. O perímetro crítico dista um valor de duas vezes a altura da laje do pilar (56 cm).

Considerando que a laje Bubbledeck® tem 28 cm de altura, o diâmetro do módulo de 22,5 cm, o peso específico do concreto seja 2500 Kg/m³, podemos calcular o peso próprio da laje. A Tabela 6.1 a seguir mostra os principais dados necessários para calcular o peso próprio. O detalhe da laje encontra-se na figura 6.1 a seguir.

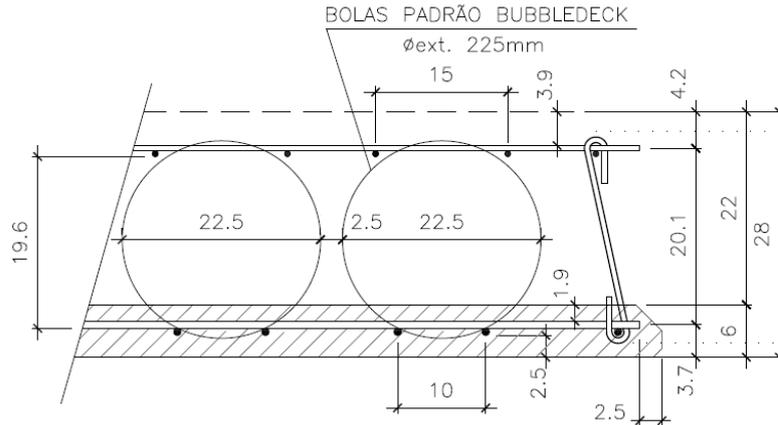


Figura 6.1. Detalhe construtivo Laje BubbleDeck®

Tabela 6.1. Dados da laje BubbleDeck®

Espessura da Laje (cm)	Volum e laje maciça (m³)	Área de Laje (m²)	Diâmetro da BD (cm)	Volume da BD (m³)	Peso específico do concreto (Kg/m³)	Espaçamento entre BD (m)	Espaçamento BD de borda (m)	Quantidade de BD por m²
28	210,728	752,6	22,5	0,005964	2500	0,025	0,125	16

A Tabela 6.2 a seguir mostra a quantidade de módulos Bubbledeck® em cada painel sem retirar a quantidade:

Tabela 6.2: Quantidade de módulos por painel

	Quantidades de painéis por pavimento	Área unit. (m²)	Área Total (m²)	Espaçamento horizontal (m)	Espaçamento vertical (m)	BDs por painel
Painéis 7,1 x 3,5	16	24,85	397,60	0,125	0,175	327
Painéis 7,0 x 3,5	8	24,50	196,00	0,125	0,125	333
Painéis 7,1 x 3,75	4	26,63	106,50	0,125	0,175	338
Painéis 7,0x 3,75	2	26,25	52,50	0,125	0,125	348
					Total	9944

As figuras Figura 6.22 e Figura 6.33 a seguir mostra a planta de cobertura das lajes Bubbledeck® com os seus painéis:

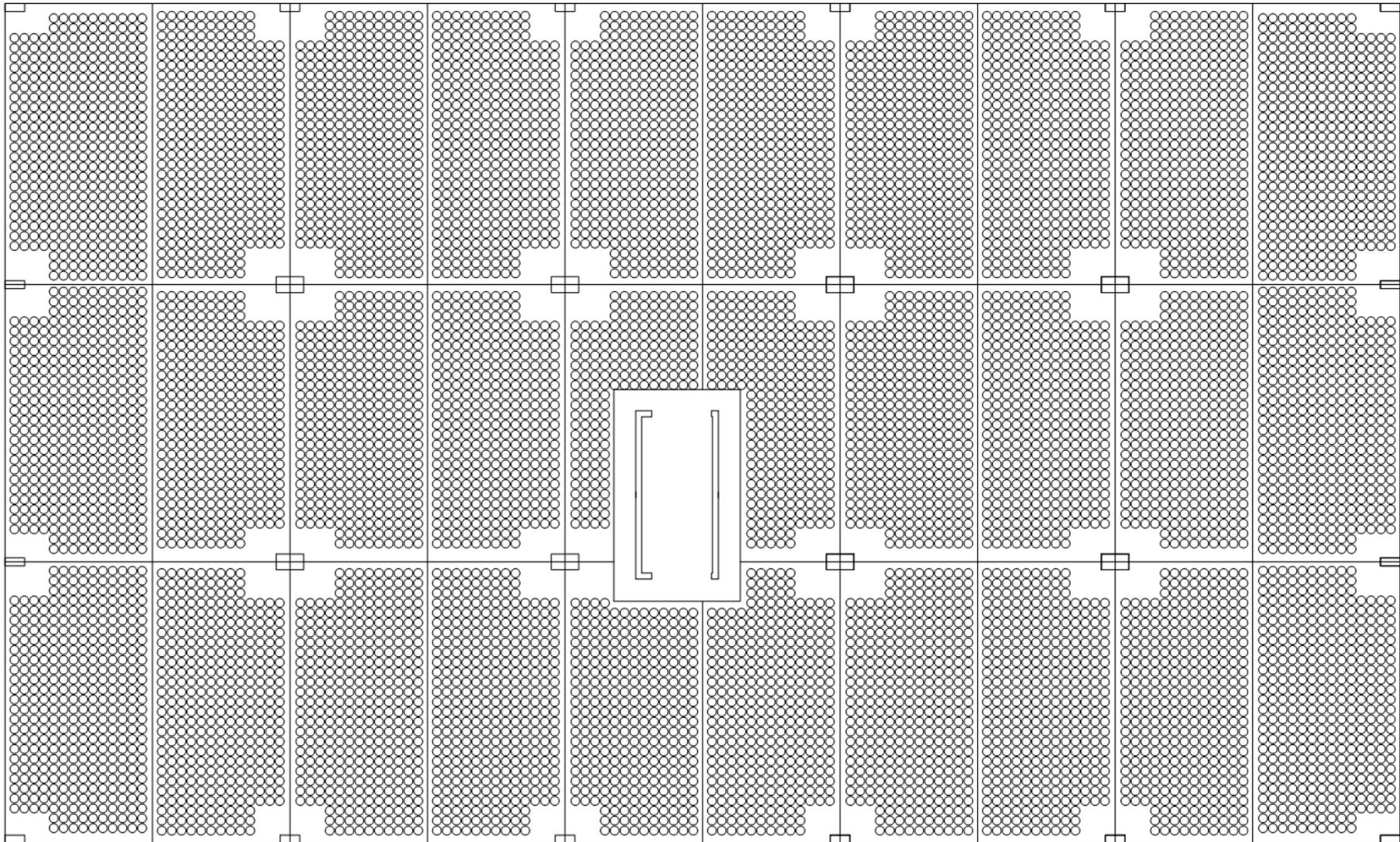


Figura 6.2: Painel da laje de cobertura BubbleDeck®

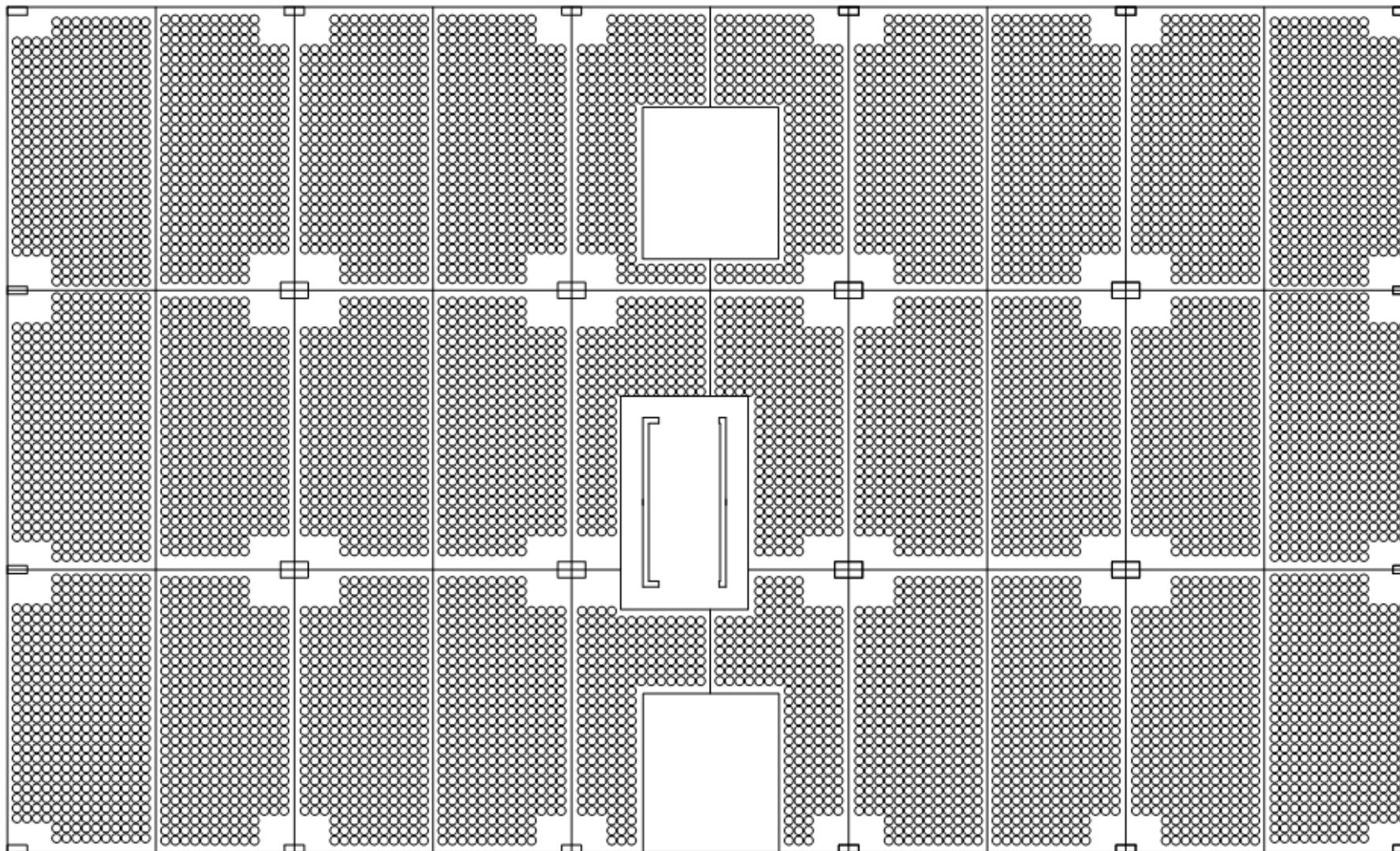


Figura 6.3: Painel de laje BubbleDeck® do térreo, 1° e 2° andar

Após calcular a quantidade total de módulos, basta calcular o volume total ocupado por eles e subtrair do volume total que uma laje lisa maciça de mesma espessura apresentaria. Para se obter o valor de carga distribuída, em kgf/m², foi calculado a espessura equivalente de uma laje Bubbledeck® em termos de volume de concreto. A espessura equivalente se obtém dividindo o volume de concreto da laje Bubbledeck® pela área da laje.

A Tabela 6.3 a seguir assimila os valores encontrados para carga distribuída tanto para a laje de cobertura quanto para os pavimentos Térreo e Tipo (iguais):

Tabela 6.3: Carga distribuída das lajes

	Volume total de BDs	Volume de Concreto em Laje BD (m ³)	Espessura equivalente (cm)	Carga Distribuída (kgf/m ²)	Porcentagem Reduzida (%)
Cobertura	59,31	151,42	20,12	502,99	28,14
Térreo e Pav. Tipo	55,54	155,19	20,62	515,51	26,36

Podemos ainda comparar que, para a laje de cobertura a porcentagem de redução da carga distribuída da laje Bubbledeck® em comparação com uma laje lisa de mesma espessura foi de 28,14% e para a laje do térreo e dos pavimentos tipo foi de 26,35%.

6.1.2 CARREGAMENTO DE ALVENARIA

Foram utilizados alvenaria de blocos cerâmicos furados, com 10 cm de espessura, revestimento de 2,5 cm de cada lado, somando uma espessura de 15 cm de parede. O peso específico da parede de alvenaria é de 16 kN/m³, dando um carregamento de 2,4 kN/m², levando-se em conta que o pé direito é de 2,88 m.

6.1.3 DEMAIS CARREGAMENTOS ATUANTES

Além do peso próprio da laje e a carga de alvenaria, atuam-se na laje também cargas de:

- Revestimento do teto de espessura de 2 cm com peso específico de 19 kN/m³, totalizando uma carga de 0,38 kN/m²;
- Contrapiso de 4 cm de espessura com peso específico de 21 kN/m³, totalizando 0,84 kN/m²;

- Piso de 1 cm de espessura com peso específico de placa cerâmica de 20 kN/m³, dando uma carga de 0,2 kN/m².

A carga de uso adotada, segundo a NBR 6120/1980, foi de 2 kN/m², referente a um edifício de uso residencial.

6.1.4 ESFORÇOS ENCONTRADOS

Os esforços no ELU encontrados encontram-se em anexo. Foram encontrados dois esforços distintos, um para a laje de cobertura, e outro para as lajes do pavimento térreo, primeiro e segundo andar. As plantas dos diagramas estão divididas em momentos na direção primária e secundária com unidade de tfm/m.

Para o cálculo das armaduras de flexão positivas e negativas e flechas, foram tomados os maiores valores de momentos correspondentes.

6.1.5 CÁLCULO DAS ARMADURAS

6.1.5.1 ARMADURA POSITIVA

Com os valores dos momentos máximos positivos dos painéis, podemos assim calcular a área de aço. Utilizando $f_{ck} = 30$ MPa, classe de agressividade ambiental II (CAA II), e cobrimento de 2,5 cm, segundo a norma 6118:2014.

Para a laje de cobertura, temos:

$$M_{k \text{ máx}} = 53,3 \text{ kN.m ou } 5,33 \times 10^3 \text{ kgf.m}$$

$$M_{d \text{ máx}} = M_{k \text{ máx}} \cdot 1,4 = 74,62 \text{ kN.m}$$

A armadura necessária para resistir o momento solicitante é dada pela fórmula:

$$A_s = \frac{M_{sd}}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} \quad (\text{Equação 6.1})$$

O coeficiente k_z , posição relativa do braço de alavanca, pode ser obtido do coeficiente k_x , que por sua vez pode ser obtido da fórmula:

$$x = 1,25 \cdot d \cdot \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{2,35 \cdot M_{sd}}{b_w f_{cd} d^2}} \right) \quad (\text{Equação 6.2})$$

$$k_z = 1 - 0,4 \cdot k_x \quad (\text{Equação 6.3})$$

Existem tabelas que apresentam os valores dos coeficientes adimensionais do cálculo da armadura de flexão. Estas tabelas estão presentes nos em CLÍMACO (2013) e em CARVALHO e FIGUEREDO (2009)

Para o valor máximo do momento positivo da laje citado acima, obtemos os seguintes valores:

$$k_x = 0,089$$

$$k_z = 0,964$$

$$A_s = 7,27 \text{ cm}^2$$

Com o valor da área de aço necessária, adotamos a configuração de de **Φ10.0 c.10**, com área de 7,85 cm²/m.

Para a laje do pavimento térreo, primeiro e segundo andar, temos:

$$M_k \text{ máx} = 64,3 \text{ kN.m ou } 6,43 \times 10^3 \text{ kgf.m}$$

$$M_d \text{ máx} = 90,0 \text{ kN.m}$$

Da mesma forma que foi calculado a área de aço para a laje de cobertura, será calculada a laje para o pavimento térreo, primeiro e segundo andar. Os valores obtidos foram os seguintes:

$$k_x = 0,108$$

$$k_z = 0,957$$

$$A_s = 8,84 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Com o valor da área de aço necessária, adotamos a configuração de **Φ12,5 c.13**, com área de 9,44 cm²/m.

6.1.5.2 ARMADURA NEGATIVA

O cálculo da armadura negativa, semelhante ao da armadura positiva, será feito com o maior valor de momento negativo das lajes.

Para a laje de cobertura, temos:

$$M_{k \text{ máx}} = 176,2 \text{ kN.m ou } 17,62 \times 10^3 \text{ kgf.m}$$

$$M_{d \text{ máx}} = 246,68 \text{ kN.m}$$

Para o valor máximo do momento positivo da laje citado acima, obtemos os seguintes valores:

$$k_x = 0,325$$

$$k_z = 0,870$$

$$A_s = 26,65 \text{ cm}^2$$

Com o valor da área de aço necessária, adotamos a configuração de **Φ20,0 c.11,0**, com área de 28,54 cm²/m.

Para a laje do térreo, primeiro andar e segundo, temos:

$$M_{k \text{ máx}} = 213,4 \text{ kN.m ou } 21,34 \times 10^3 \text{ kgf.m}$$

$$M_{d \text{ máx}} = 298,76 \text{ kN.m}$$

Para o valor máximo do momento positivo da laje citado acima, obtemos os seguintes valores:

$$k_x = 0,409$$

$$k_z = 0,836$$

$$A_s = 33,58 \text{ cm}^2$$

Com o valor da área de aço necessária, adotamos a configuração de $\Phi 20$ c.9,0, com área de 35,38 cm²/m. A Tabela 6.4 a seguir mostra o resumo dos resultados da armadura da laje BubbleDeck[®] dimensionada pelo TQS.

Tabela 6.4. Áreas de aço e quantidade de ferro para momentos máximos da laje BubbleDeck[®] pelo TQS

Laje	Armadura	M _d Máx (kN.m)	A _s requerido (cm ² /m)	Quantidade de barras	A _s adotado (cm ² /m)
Cobertura	Armadura positiva	74,62	7,27	$\Phi 10,0$ c.9	7,85
	Armadura negativa	246,68	26,65	$\Phi 20,0$ c.11	28,54
Térreo 1° e 2° andar	Armadura positiva	90	8,84	$\Phi 12,5$ c.13	9,44
	Armadura negativa	298,76	35,38	$\Phi 20,0$ c.9	35,38

6.1.6 CÁLCULO DA FLECHA

Segundo a NBR 6118:2014, o cálculo da deformação da estrutura deve ser realizado através de modelos que considerem a rigidez efetiva das seções do elemento estrutural, ou seja, que levem em consideração a presença da armadura, a existência de fissuras no concreto ao longo dessa armadura e as deformações diferidas no tempo.

O cálculo das deformações é feito utilizando combinação de carga quase-permanente. Segundo a norma NBR6118:2014 → Tabela 11.2, o valor de Ψ_2 adotado para essa combinação de carga é de 0,4, que corresponde a lugares em que há predominância de pesos de equipamentos fixos por longos períodos de tempo, ou elevada concentração de pessoa.

$$M_{d,ser} = M_{gk} + 0,4 \cdot M_{qk} \quad (\text{Equação 6.4})$$

O modelo de comportamento da estrutura pode admitir o concreto e o aço como materiais de comportamento elástico e linear, de modo que as seções ao longo do elemento estrutural possam ter as deformações específicas determinadas no estágio I, desde que os esforços não superem aqueles que dão início à fissuração, e no estágio II, em caso contrário. A separação das partes do elemento num ou noutro estágio é definida pelo momento de fissuração, dado pela expressão aproximada da NBR 6118 → 17.3.1:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t} \quad (\text{Equação 6.5})$$

Onde,

α = parâmetro que relaciona as resistências do concreto a tração na flexão e direta.

y_t = distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada.

I_c = momento de inércia da seção bruta de concreto.

f_{ct} = é a resistência à tração direta do concreto.

Para o limite de serviço de deformação de estruturas usuais de concreto, o momento de fissuração é:

$$M_r = 0,075 \cdot b_w \cdot h^2 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (\text{Equação 6.6})$$

Se o valor do momento encontrado for inferior ao valor de M_r , a peça não fissurou, logo encontra-se no estágio I. Caso o valor do momento seja superior ao momento de fissuração, a peça encontra-se fissurada, encontrando-se no estágio II.

6.1.6.1 CÁLCULO APROXIMADO DA FLECHA IMEDIATA SOB AÇÕES DE CURTA DURAÇÃO

A flecha imediata máxima pode ser obtida pela expressão:

$$f_i = \alpha \frac{M_a \cdot l^2}{0,9 \cdot (EI)_{eq}} \quad (\text{Equação 6.7})$$

Onde,

M_a = momento característico máximo no vão;

l = vão efetivo ou teórico;

$(EI)_{eq}$ = rigidez equivalente da seção transversal, dada pela fórmula de Branson, utilizada por diversas normas internacionais, que faz um balanço dos trechos no estágio I e no estágio II, definida por:

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \cdot I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] \cdot I_{II} \right\} \quad (\text{Equação 6.8})$$

Onde,

M_r = momento de fissuração, dado pela Equação

E_s = módulo de elasticidade do aço ($2,1 \times 10^5$ MPa);

E_{cs} = módulo de elasticidade secante do concreto ;

I_{II} = momento de inércia da seção fissurada no estágio II. Para a seção retangular com armadura simples, é dado por:

$$I_{II} = (E_s/E_c) \cdot A_s \cdot z(d - x_{II}) \quad (\text{Equação 6.9})$$

Onde,

A_z = área da armadura tracionada;

z = braço de alavanca das resultantes de tração e compressão;

x_{II} = profundidade da linha neutra na seção, dada pela expressão:

$$x_{II} = \frac{\alpha_e \cdot A_s}{b_w} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2b_w \cdot d}{\alpha_e \cdot A_s}} \right) \quad (\text{Equação 6.10})$$

Onde,

α_e = razão dos módulos de elasticidade do aço e do concreto, com o módulo secante do concreto igual a:

$$E_{cs} = 4760 \cdot f_{ck}^{1/2} \text{ MPa} \quad (\text{Equação 6.11})$$

6.1.6.2 CÁLCULO APROXIMADO DA FLECHA FINAL DAS AÇÕES DE LONGA DURAÇÃO

Segundo a NBR 6118:2014, a flecha adicional diferida, decorrente das cargas de longa duração em função da fluência, pode ser calculada de maneira aproximada pela multiplicação da flecha imediata pelo fator α_f dado pela expressão:

$$f_{dif} = \alpha_f \cdot f_i \quad (\text{Equação 6.12})$$

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1+50\rho'} \quad (\text{Equação 6.13})$$

Sendo:

$\rho' = A's/bd$ = taxa de armadura de compressão na seção crítica do vão considerado;

$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0)$ = coeficiente de fluência diferida, em função do tempo t.

A Tabela 6.5 a seguir mostra o valor do coeficiente ξ em função do tempo.

Tabela 6.5: Valores do coeficiente ξ em função do tempo (NBR 6118/2014 Tabela 17.1)

Tempo (t) meses	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	≥ 70
Coeficiente ξ (t)	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

6.1.6.3 RESULTADO DA FLECHA IMEDIATA E DE LONGA DURAÇÃO PARA AS LAJES BUBBLEDECK®

A Tabela 6.6 a seguir mostra o valor encontrado para as flechas imediatas, diferidas e total das lajes BubbleDeck® da cobertura e dos demais pavimentos.

O valor de b_w adotado foi de 100 cm. O valor de M_a é o valor máximo positivo atuante em cada laje.

Sendo a carga de longa duração, com a retirada do escoramento, aplicada à estrutura com a idade de um mês, considerando-se para a estimativa da flecha diferida a idade de 70 meses e a ausência de armadura resistente de cálculo à compressão, pela tabela 6.4 temos que o valor de $\Delta\xi$ é igual a 1,32.

Tabela 6.6. Flechas imediatas, diferidas e total das lajes BubbleDeck®

Laje	As (cm ²)	d (cm)	M_a (kN.m)	M_r (kN.m)	(EI) _{eq}	Flecha f_i (mm)	Flecha f_{dif} (mm)	Flecha f_{tot} (mm)
Cobertura	7,85	24,5	53,3	56,77	$5,61 \times 10^{13}$	5,38	7,11	12,50
Térreo, 1º e 2º andar	9,44	24,5	64,3	56,77	$3,55 \times 10^{13}$	10,27	13,55	23,82

6.2 DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DIRETO

O dimensionamento de uma laje BubbleDeck® utilizando o método direto deve ser feito utilizando as considerações já mencionadas acima para dimensionamento. Deve-se fazer a redução do peso próprio e utilizar um coeficiente de 0,9 na rigidez do concreto para o cálculo da deformação. Vale ressaltar que na laje do térreo, primeiro e segundo andar foi desconsiderada as aberturas das escadas e do elevador, devido às limitações do Método Direto. Diante disso, todas lajes serão completamente preenchidas, diferindo apenas os carregamentos.

6.2.1 CARREGAMENTOS ATUANTES

Os carregamentos a serem considerados para o dimensionamento são os mesmos já calculados na seção 6.1.1, 6.1.2 e 6.1.3:

- Peso próprio: 5 kN/m²
- Alvenaria: 2,4 kN/m².
- Revestimento de teto: 0,38 kN/m²

- Contrapiso: 0,84 kN/m²
- Piso: 0,2 kN/m²
- Carga de uso: 2 kN/m²

6.2.2 ESFORÇOS ENCONTRADOS

A partir dos carregamentos atuantes nas lajes podem-se encontrar os valores dos momentos positivos e negativos. Para que possa ser aplicado o método direto, primeiramente é necessário verificar às restrições quanto a geometria. O número de painéis segundo uma direção é igual a cinco, e segundo a outra é igual a três, portanto restrição atendida. Os painéis são todos quadrangulares, 7 x 7m, portanto a razão entre os vãos é igual a um e a restrição está atendida. Todos os vãos apresentam o mesmo vão de 7m, portanto não há diferenças entre os vãos teóricos sucessivos, então a restrição está atendida. Finalmente, quanto ao desalinhamento dos pilares, a restrição também está atendida, pois não há nenhum pilar desalinhado.

Devido a dupla simetria da estrutura, basta definir as faixas de projeto FPx1, FPx2, FPy1 e FPy2, ou seja, faixas de projeto nas direções primária e secundária, apresentadas nas figuras a seguir:

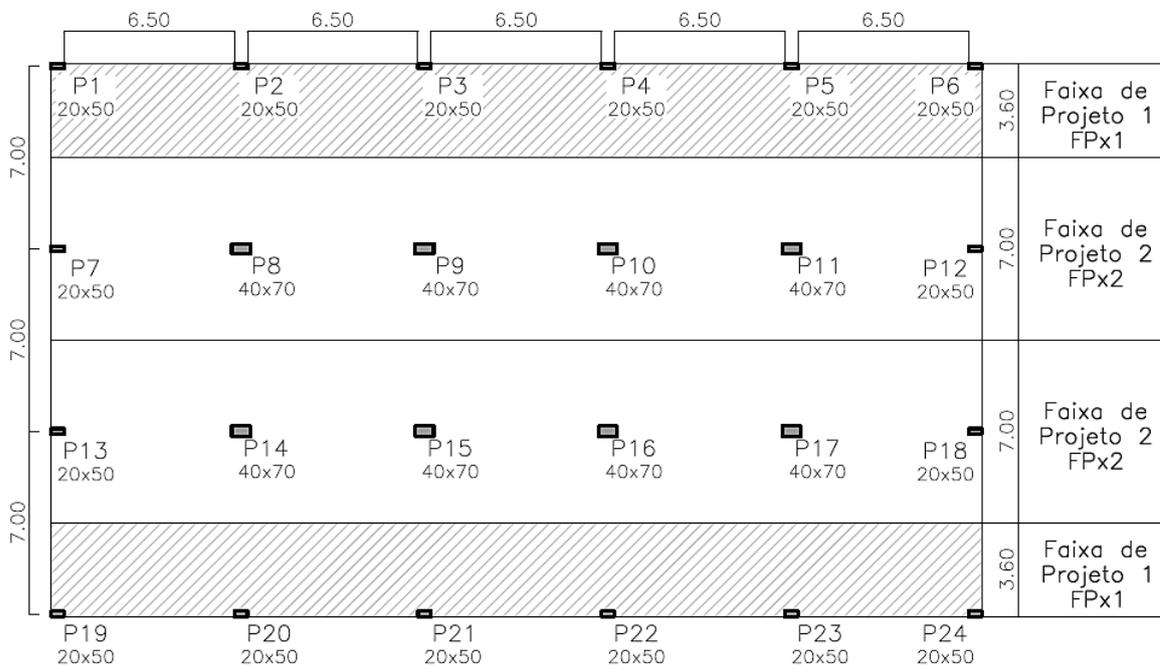


Figura 6.4. Faixas de Projeto na direção principal

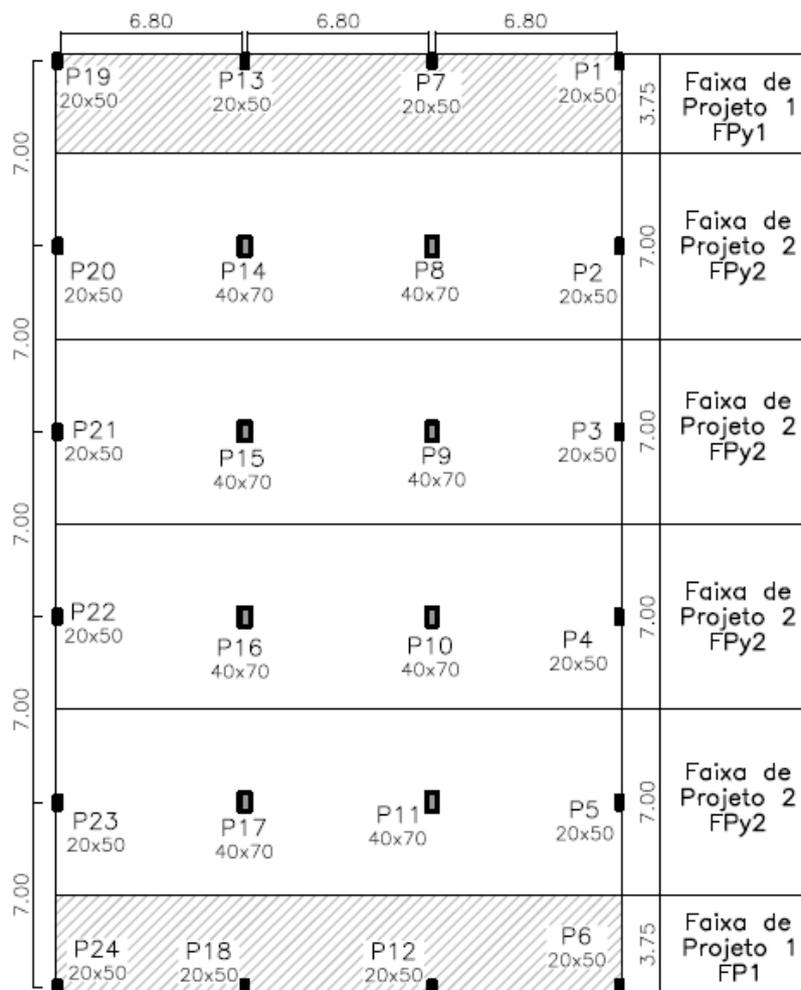


Figura 6.5. Faixas de Projeto na direção secundária

Como já foi descrito na seção 3.2, o momento de referência M_0 foi determinado para o carregamento total ($g + q$) para cada uma das faixas de projeto, depois transformado em dois momentos negativos M_a e M_c e um momento positivo M_b , os valores foram encontrados considerando que há viga de borda nos pavimentos. Em seguida, foi feita a distribuição dos momentos nas faixas de projeto.

Para as lajes do térreo, 1º e 2º andar os resultados são apresentados nas tabelas e figuras a seguir.

Tabela 6.7. Dados e resultados para as lajes do térreo, 1º e 2º pavimento, na direção principal.

Faixa de Projeto	Vão	ℓ1	ℓ2	ℓn	Mo	Ma	Mb	Mc
FPx 1	1	7,00	3,60	6,50	205,72	-61,71	102,86	-144,00
	2	7,00	3,60	6,50	205,72	-133,71	72,00	-133,71
	3	7,00	3,60	6,50	205,72	-133,71	72,00	-133,71
	4	7,00	3,60	6,50	205,72	-133,71	72,00	-133,71
	5	7,00	3,60	6,50	205,72	-144,00	102,86	-61,71
FPx 2	1	7,00	7,00	6,50	400,00	-104,00	208,00	-280,00
	2	7,00	7,00	6,50	400,00	-260,00	140,00	-260,00
	3	7,00	7,00	6,50	400,00	-260,00	140,00	-260,00
	4	7,00	7,00	6,50	400,00	-260,00	140,00	-260,00
	5	7,00	7,00	6,50	400,00	-280,00	208,00	-104,00

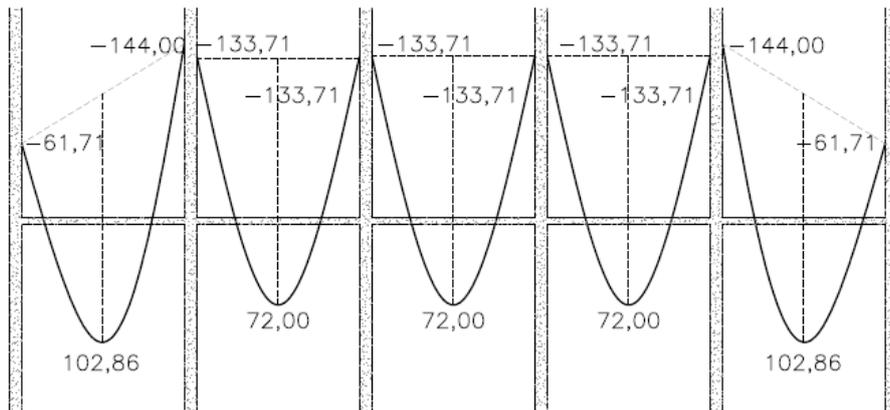


Figura 6.6. Momentos da faixa de projeto 1, na direção principal, para as lajes do pavimento tipo

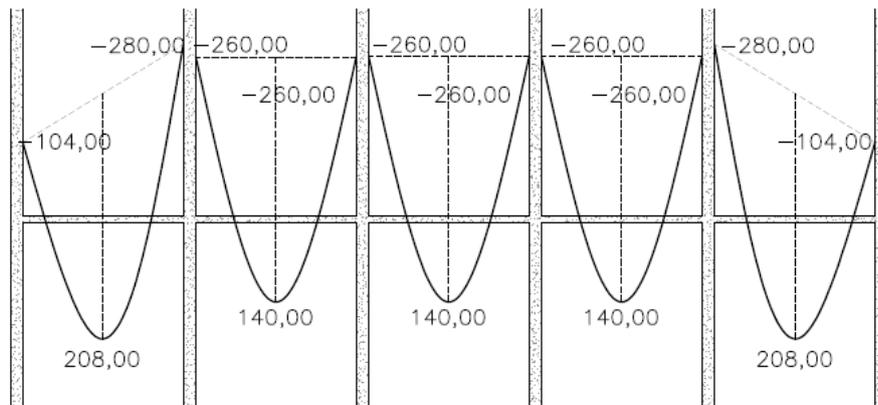
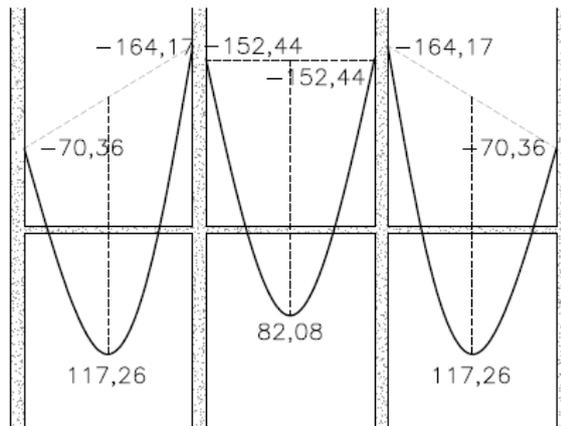


Figura 6.7. Momentos da faixa de projeto 2, na direção principal, para as lajes do pavimento tipo



As figuras

Figura 6.8, e 6.9 a seguir, assim como a tabela 6.7 mostram os momentos M_a , M_b e M_c para a laje do térreo, 1º e 2º andar na direção secundária para as faixas de projeto 1 e 2.

Tabela 6.8. Dados e resultados para as lajes do térreo, 1º e 2º pavimento, na direção secundária.

Faixa de Projeto	Vão	ℓ_1	ℓ_2	ℓ_n	M_o	M_a	M_c	M_b
FPy 1	1	7,00	3,75	6,80	234,52	-70,36	117,26	-164,17
	2	7,00	3,75	6,80	234,52	-152,44	82,08	-152,44
	3	7,00	3,75	6,80	234,52	-164,17	117,26	-70,36
FPy 2	1	7,00	7,00	6,80	437,78	-113,82	227,64	-306,44
	2	7,00	7,00	6,80	437,78	-284,56	153,22	-284,56
	3	7,00	7,00	6,80	437,78	-306,44	227,64	-113,82

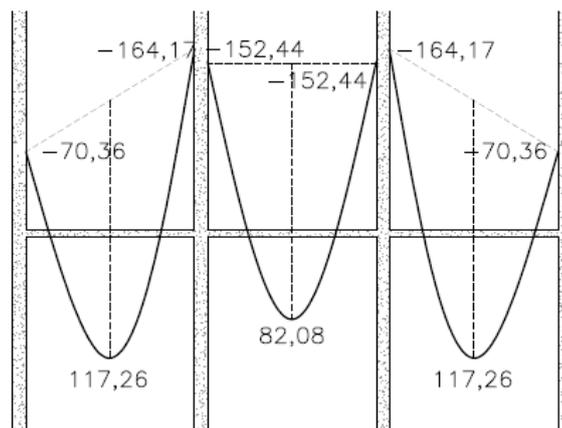


Figura 6.8: Momentos na direção secundária na faixa de projeto 1, para as lajes do térreo, 1º e 2º pavimento.

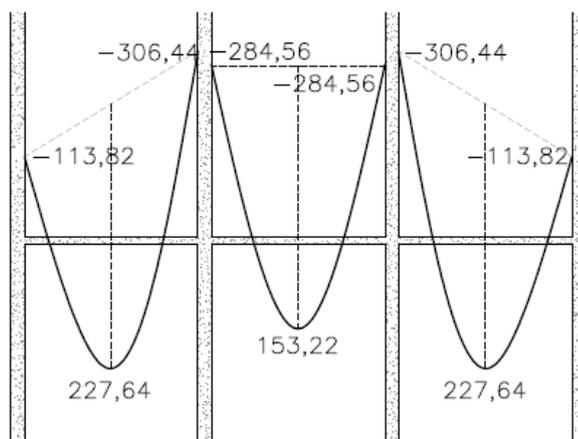


Figura 6.9: Momentos na direção secundária na faixa de projeto 2, para as lajes do térreo, 1º e 2º pavimento.

As figuras a seguir mostram a distribuição dos momentos nas faixas seguindo os critérios de distribuição apresentados na seção 3.2.5 para as lajes do pavimento tipo.

-59,43		-120,00		-111,43		-111,43		-111,43		-59,43		Faixa do Pilares externos
P1	59,43	P2	59,43	P3	59,43	P4	59,43	P5	59,43	P6		
0,00	29,65	-25,14	20,11	-23,35	20,11	-23,35	20,11	-25,14	29,65	0,00		Faixa Central externa
-17,63		-30,86		-28,65		-28,65		-30,86		-17,63		Faixa do Pilares internos
P7	17,63	P8	12,34	P9	12,34	P10	12,34	P11	17,63	P12		
0,00	11,76	-10,29	8,23	-9,55	8,23	-9,55	8,23	-10,29	11,76	0,00		Faixa Central interna
-17,63		-30,86		-28,65		-28,65		-30,86		-17,63		Faixa do Pilares internos
P13	17,63	P14	12,34	P15	12,34	P16	12,34	P17	17,63	P18		
0,00	29,65	-25,14	20,11	-23,35	20,11	-23,35	20,11	-25,14	29,65	0,00		Faixa Central externa
-59,43		-120,00		-111,43		-111,43		-111,43		-59,43		Faixa do Pilares externos
P19	59,43	P20	59,43	P21	59,43	P22	59,43	P23	59,43	P24		

Figura 6.10. Resultados finais de momentos para o pavimento tipo na direção principal

-65,04									
P19	78,05	P13	52,53	P7	78,05	P1			Faixa do Pilares externos
0,00	20,45	-27,75	13,18	-27,75	20,45	0,00			Faixa Central externa
-20,10									
P20	20,10	P14	14,07	P8	14,07	P2			Faixa do Pilares internos
0,00	13,40	-11,73	9,38	-11,73	13,40	0,00			Faixa Central interna
-20,10									
P21	20,10	P15	14,07	P9	14,07	P3			Faixa do Pilares internos
0,00	13,40	-11,73	9,38	-11,73	13,40	0,00			Faixa Central interna
-20,10									
P22	20,10	P16	14,07	P10	14,07	P4			Faixa do Pilares internos
0,00	13,40	-11,73	9,38	-11,73	13,40	0,00			Faixa Central interna
-20,10									
P23	20,10	P17	14,07	P11	14,07	P5			Faixa do Pilares internos
0,00	20,45	-27,75	13,18	-27,75	20,45	0,00			Faixa Central externa
-65,04									
P24	78,05	P18	52,53	P12	78,05	P6			Faixa do Pilares externos

Figura 6.11. Resultados finais de momentos para o pavimento tipo na direção secundária

Em seguida, é necessário realizar o mesmo procedimento para a laje de cobertura, já que esta apresenta carregamento total diferente, de 8,22 kN/m². As tabelas e figuras a seguir apresentam os resultados para a laje de cobertura em cada uma das direções.

Tabela 6.9. Dados e resultados para as lajes de cobertura, na direção principal.

Faixa de Projeto	Vão	ℓ_1	ℓ_2	ℓ_n	M_o	M_a	M_b	M_c
FPx 1	1	7,00	3,60	6,50	156,28	-46,88	78,14	-109,40
	2	7,00	3,60	6,50	156,28	-101,58	54,70	-101,58
	3	7,00	3,60	6,50	156,28	-101,58	54,70	-101,58
	4	7,00	3,60	6,50	156,28	-101,58	54,70	-101,58
	5	7,00	3,60	6,50	156,28	-109,40	78,14	-46,88
FPx 2	1	7,00	7,00	6,50	303,88	-79,01	158,02	-212,72
	2	7,00	7,00	6,50	303,88	-197,52	106,36	-197,52
	3	7,00	7,00	6,50	303,88	-197,52	106,36	-197,52
	4	7,00	7,00	6,50	303,88	-197,52	106,36	-197,52
	5	7,00	7,00	6,50	303,88	-212,72	158,02	-79,01

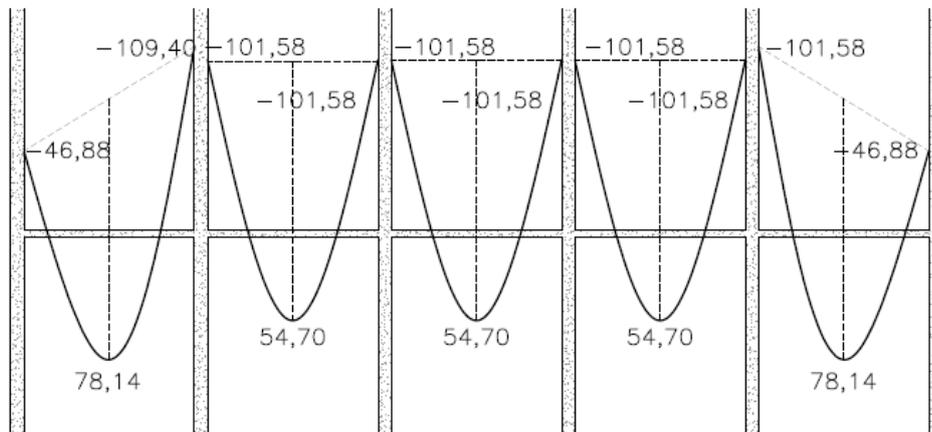


Figura 6.12. Momentos da faixa de projeto 1, na direção principal, para as lajes da cobertura

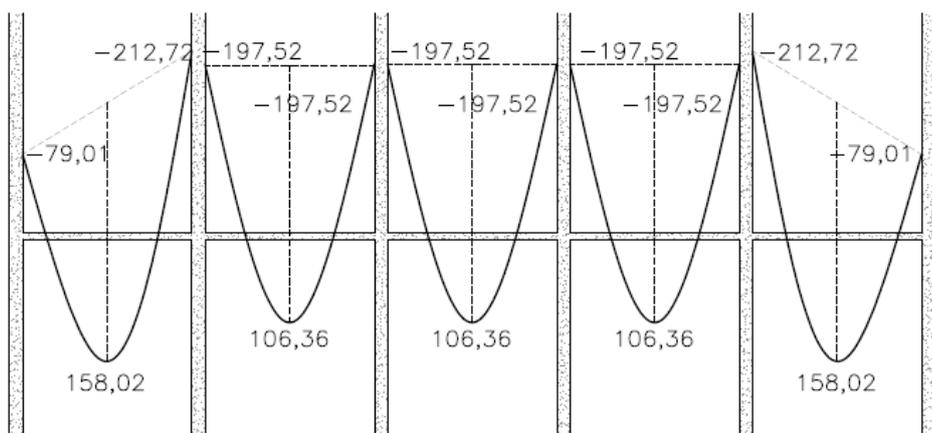


Figura 6.13. Momentos da faixa de projeto 2, na direção principal, para as lajes da cobertura

Tabela 6.10. Dados e resultados para as lajes de cobertura, na direção secundária.

Faixa de Projeto	Vão	ℓ_1	ℓ_2	ℓ_n	M_o	M_a	M_c	M_b
FPy 1	1	7,00	3,75	6,80	178,17	-53,45	89,08	-124,72
	2	7,00	3,75	6,80	178,17	-115,81	62,36	-115,81
	3	7,00	3,75	6,80	178,17	-124,72	89,08	-53,45
FPy 2	1	7,00	7,00	6,80	332,58	-86,47	172,94	-232,81
	2	7,00	7,00	6,80	332,58	-216,18	116,40	-216,18
	3	7,00	7,00	6,80	332,58	-232,81	172,94	-86,47

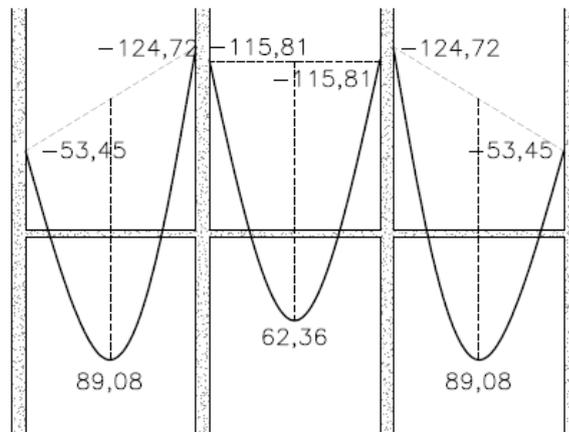


Figura 6.14. Momentos da faixa de projeto 1, na direção secundária, para as lajes da cobertura

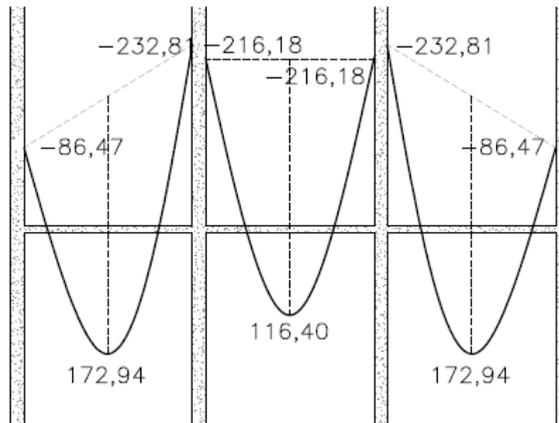


Figura 6.15. Momentos da faixa de projeto 2, na direção secundária, para as lajes da cobertura

-45,15		-19,16		-84,65		-84,65		-19,16		-45,15					
P1	54,18		P2	36,47		P3	36,47		P4	36,47		P5	54,18	P6	Faixa do Pilares externos
0,00	22,52	-19,10	15,28	-17,74	15,28	-17,74	15,28	-19,10	22,52	0,00					Faixa Central externa
-13,40		-23,44		-21,47		-21,47		-23,44		-13,40					Faixa do Pilares internos
P7	13,40		P8	9,38		P9	9,38		P10	9,38		P11	13,40	P12	Faixa Central interna
0,00	8,93	-7,81	6,25	-7,26	6,25	-7,26	6,25	-7,81	8,93	0,00					Faixa do Pilares internos
-13,40		-23,44		-21,47		-21,47		-23,44		-13,40					Faixa Central externa
P13	13,40		P14	9,38		P15	9,38		P16	9,38		P17	13,40	P18	Faixa do Pilares externos
0,00	22,52	-19,10	15,28	-17,74	15,28	-17,74	15,28	-19,10	22,52	0,00					Faixa Central interna
-45,15	54,18	-19,16	36,47	-84,65	36,47	-84,65	36,47	-19,16	54,18	-45,15					Faixa do Pilares externos
P19		P20		P21		P22		P23		P24					

Figura 6.16. Resultados finais de momentos para o pavimento cobertura na direção principal

-49,41		-99,77		-99,77		-49,41									
P19	59,29		P13	39,91		P7	59,29	P1							Faixa do Pilares externos
0,00	15,53	-21,08	10,54	-21,08	15,53	0,00									Faixa Central externa
-15,27		-26,76		-26,76		-15,27									Faixa do Pilares internos
P20	15,27		P14	10,69		P8	15,27	P2							Faixa Central interna
0,00	10,18	-8,91	7,13	-8,91	10,18	0,00									Faixa do Pilares internos
-15,27		-26,76		-26,76		-15,27									Faixa Central externa
P21	15,27		P15	10,69		P9	15,27	P3							Faixa do Pilares internos
0,00	10,18	-8,91	7,13	-8,91	10,18	0,00									Faixa Central interna
-15,27		-26,76		-26,76		-15,27									Faixa do Pilares internos
P22	15,27		P16	10,69		P10	15,27	P4							Faixa Central externa
0,00	10,18	-8,91	7,13	-8,91	10,18	0,00									Faixa do Pilares internos
-15,27		-26,76		-26,76		-15,27									Faixa Central interna
P23	15,27		P17	10,69		P11	15,27	P5							Faixa do Pilares internos
0,00	15,53	-21,08	10,54	-21,08	15,53	0,00									Faixa Central externa
-49,41	59,29	-99,77	39,91	-99,77	59,29	-49,41									Faixa do Pilares externos
P24		P18		P12		P6									

Figura 6.17. Resultados finais de momentos para o pavimento cobertura na direção secundária

6.2.3 CÁLCULO DAS ARMADURAS

Com o maior valor do momento máximo positivo entre as duas direções da laje, pode-se calcular a armadura necessária para resistir aos esforços solicitantes. Utilizando $f_{ck} = 30$ MPa, classe de agressividade ambiental II (CAA II), e cobrimento de 3,0 cm, segundo a norma 6118:2014. O cálculo é similar ao apresentado na seção 6.1.5, alterando apenas o valor dos momentos.

As tabelas Tabela 6.11 e Tabela 6.12 a seguir mostram resumidamente os resultados da área de aço para as lajes do edifício.

Tabela 6.11. Áreas de aço e quantidade de ferro para momentos máximos da laje da cobertura

	M_d Máx (kN.m)	A_s requerido (cm ² /m)	Quantidade de barras	A_s adotado (cm ² /m)
Armadura positiva	83,0	8,12	Φ10,0 c.9.5	8,27
Armadura negativa	-139,7	14,10	Φ16,0 c.14	14,36

Tabela 6.12. Áreas de aço e quantidade de ferro para momentos máximos da laje do térreo, 1° e 2° andar.

	M_d Máx (kN.m)	A_s requerido (cm ² /m)	Quantidade de barras	A_s adotado (cm ² /m)
Armadura positiva	109,8	10,90	Φ12,5 c.11	11,16
Armadura negativa	-183,8	19,05	Φ16,0 c.10	20,11

6.2.4 CÁLCULO DA FLECHA IMEDIATA E DIFERIDA

A tabela Tabela 6.1312 a seguir mostra o valor encontrado para as flechas imediatas, diferidas e total das lajes BubbleDeck[®] da cobertura e dos demais pavimentos. O cálculo utilizado já foi descrito na seção 6.1.6 deste capítulo e os parâmetros utilizados para ξ foram os mesmos.

Cabe ressaltar que os valores dos momentos resultantes utilizados para calcular as flechas foram provenientes da combinação de carga quase-permanente, assim como estipula a NBR 6118:2014.

Tabela 6.13: Flechas imediatas, diferidas e total das lajes BubbleDeck® pelo Método Direto

Laje	As (cm ²)	d (cm)	M _a (kN.m)	M _r (kN.m)	(EI) _{eq}	Flecha f _i (mm)	Flecha f _{dif} (mm)	Flecha f _{tot} (mm)
Cobertura	8,27	24,5	50,6	56,77	6,42x10 ¹³	4,47	5,90	10,36
Térreo, 1° e 2° andar	11,16	24,5	69,3	56,77	2,58x10 ¹³	12,40	16,37	28,76

6.3 DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DO PÓRTICO EQUIVALENTE

Devido à dupla simetria do pavimento, será necessário calcular apenas um pórtico, indicado na figura 6.18 a seguir. O pórtico foi definido segundo o modelo apresentado na NBR 6118:2014. Foram traçadas retas pelo centro dos pilares de modo a dividir o pavimento em faixas com larguras iguais aos vãos teóricos dos painéis, essas faixas serão as vigas dos pórticos e terão alturas iguais à espessura da laje em questão, para a laje BubbleDeck® em estudo, 28 cm.

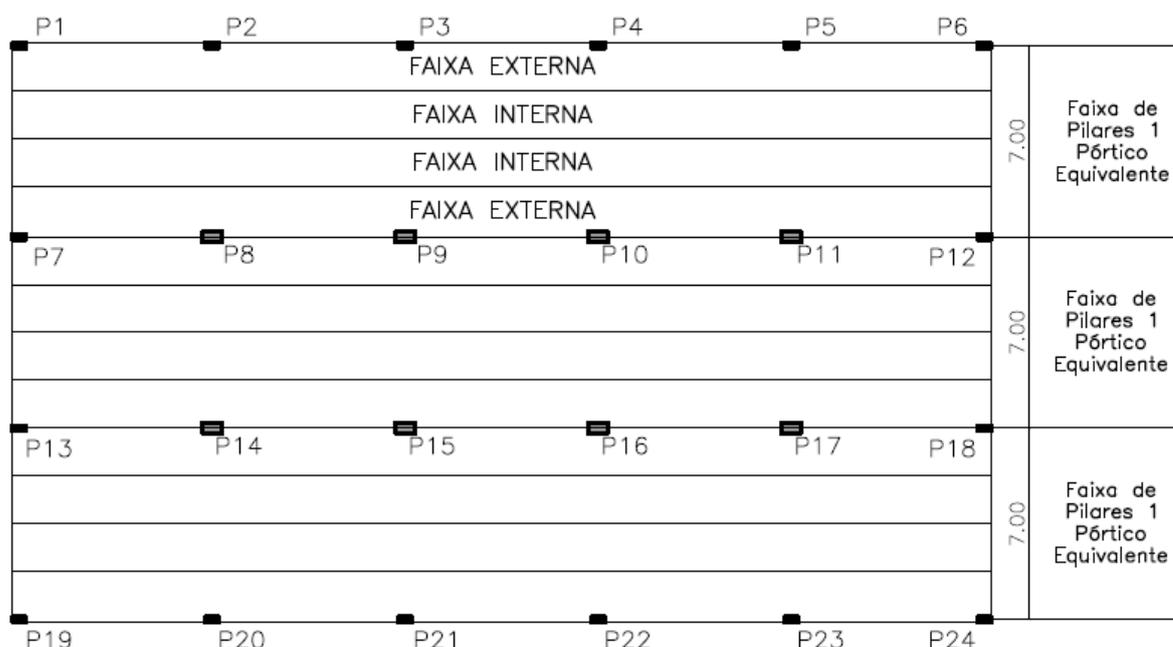


Figura 6.18. Faixas de pilares para Método do Pórtico Equivalente na direção principal

O carregamento atuante é obtido a partir da carga total e a distância entre as linhas de eixo dos pilares (7 m). Para o pavimento tipo esse carregamento vale 10,82 kN/m². Nesse caso, o pórtico assume o aspecto apresentado na figura 6.19, com pilares engastados na base e no topo, por serem lajes intermediárias. Os resultados para o pavimento tipo para cada uma das faixas de pilares da direção principal são apresentados na tabela 6.13 e 6.14 e nas figuras 6.19, 6.20 e 6.21 a seguir.

Tabela 6.14. Dados e momentos de referência para as lajes dos pavimentos tipo

Vão (m)	Carregamento distribuído (kN/m)	Momentos de Referência (kN.m)					
		Positivo Tramo externo	Positivo Tramo Interno	Positivo Tramo Central	Negativo Pilar externo	Negativo Pilar Interno	Negativo Pilares Centrais
7,00	75,74	170,20	153,50	154,80	256,60	332,40	309,10

Tabela 6.15. Momentos Distribuídos nas faixas

Faixas	Momentos Positivos (kN.m)			Momentos Negativos (kN.m)		
	Tramo Externo	Tramo Interno	Tramo Central	Pilar Externo	Pilar Interno	Pilar Central
Faixa externa	46,81	42,21	42,57	96,23	124,65	115,91
Faixa interna	76,59	69,08	69,66	64,15	83,10	77,28

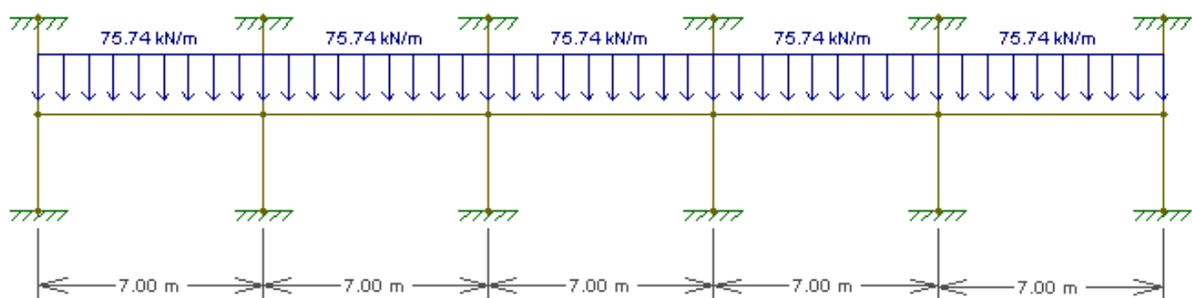


Figura 6.19. Pórtico Equivalente para lajes do Pavimento Tipo

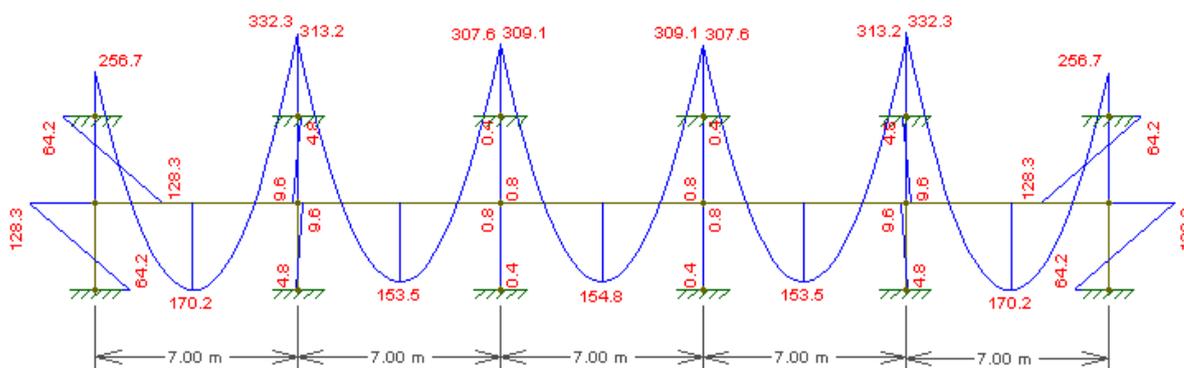


Figura 6.20. Diagrama de Momentos Fletores de Referência para lajes de Pavimento Tipo

-96,23	46,81	-124,65	42,21	-115,91	42,21	-115,91	42,21	-124,65	46,81	-96,23	7,00
P1	P2	P3	P4	P5	P6						
-64,15	83,10	-77,28	-77,28	83,10	-64,15						
76,59	69,08	69,08	69,08	69,08	76,59						
-96,3	46,81	-124,65	42,21	-115,91	42,21	-115,91	42,21	-124,65	46,81	-96,3	
P7	P8	P9	P10	P11	P12						

Figura 6.21. Resultados finais de momentos para o Pavimento Tipo

Para o pavimento cobertura o carregamento total é de 8,22 kN/m², nesse caso, o pórtico a ser considerado tem o aspecto apresentado na figura 6.22, com os pilares engastados na base. Os resultados são apresentados na tabela 6.15 e 6.16 e nas figuras 6.24, 6.25 e 6.26 a seguir.

Tabela 6.16. Dados e momentos de referência para as lajes do pavimento cobertura

Vão (m)	Carregamento distribuído (kN/m)	Momentos de Referência (kN.m)					
		Positivo Tramo externo	Positivo Tramo Interno	Positivo Tramo Central	Negativo Pilar externo	Negativo Pilar Interno	Negativo Pilares Centrais
7,00	57,54	139,50	115,20	118,10	165,90	263,40	234,30

Tabela 6.17. Momentos distribuídos nas faixas da laje de cobertura

Faixas	Momentos Positivos (kN.m)			Momentos Negativos (kN.m)		
	Tramo Externo	Tramo Interno	Tramo Central	Pilar Externo	Pilar Interno	Pilar Central
Faixa externa	38,36	31,68	32,48	62,21	98,78	87,86
Faixa interna	62,78	51,84	53,15	41,48	65,85	58,58

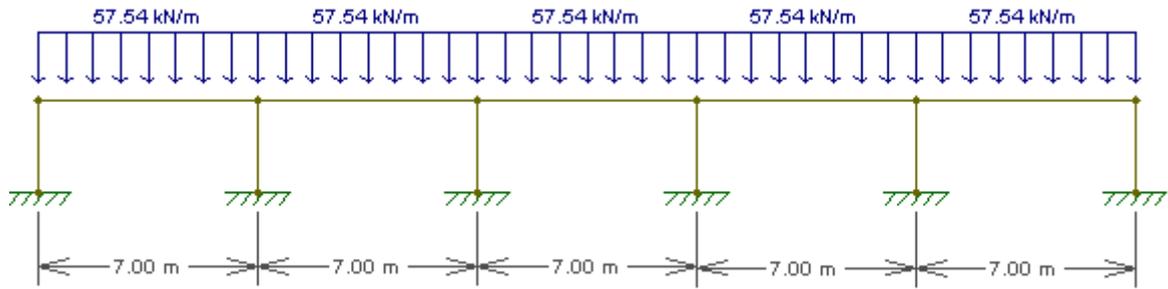


Figura 6.22. Pórtico equivalente para lajes do pavimento cobertura

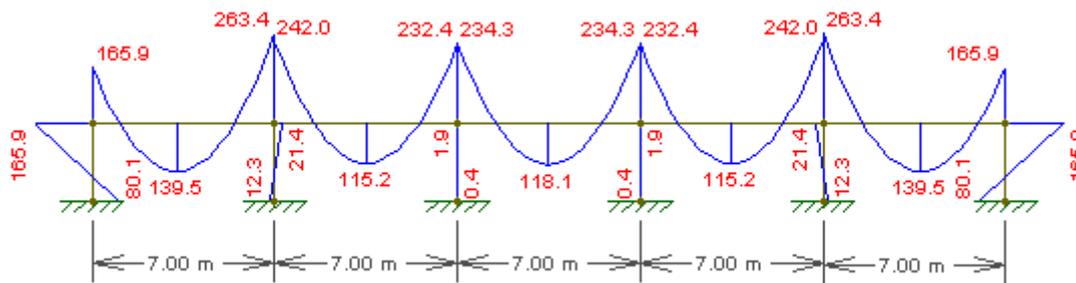


Figura 6.23. Diagrama de Momentos Fletores de Referência para lajes do Pavimento Cobertura

-62,21	38,36	-98,78	31,68	-87,86	31,68	-87,86	31,68	-98,78	38,36	-62,21
P1		P2		P3		P4		P5		P6
-41,48		-65,85		-58,58		-58,58		-65,85		-41,48
	62,78		51,84		51,84		51,84		62,78	
-62,21	38,36	-98,78	31,68	-87,86	31,68	-87,86	31,68	-98,78	38,36	-62,21
P7		P8		P9		P10		P11		P12

Figura 6.24. Momentos finais Laje de Cobertura

6.3.1 CÁLCULO DAS ARMADURAS

O cálculo da armadura positiva e negativa de flexão é o mesmo mostrado na seção 6.1.5. A Tabela 6.18 mostra os valores dos momentos máximos e as armaduras encontradas.

Tabela 6.18: Áreas de aço e quantidade de ferro para momentos máximos da laje lisa pelo Método dos Pórticos Equivalentes

Laje	Armadura	$M_d \text{ Máx}$ (kN.m)	A_s requerido (cm ² /m)	Quantidade de barras	A_s adotado (cm ² /m)
Cobertura	Armadura positiva	87,89	8,62	φ12,5 c. 14	9,82
	Armadura negativa	138,29	13,95	φ16 c. 14	16,08
Térreo 1° e 2° andar	Armadura positiva	107,23	10,63	φ12,5 c. 11	12,27
	Armadura negativa	174,51	17,98	φ16 c. 11	20,11

6.3.2 FLECHAS E ALTURAS EQUIVALENTES

A tabela Tabela 6.1318 a seguir mostra o valor encontrado para as flechas imediatas, diferidas e total das lajes BubbleDeck® da cobertura e dos demais pavimentos. O cálculo utilizado já foi descrito na seção 6.1.6 deste capítulo e os parâmetros utilizados para ξ foram os mesmos.

Tabela 6.19: Flechas imediatas, diferidas e total das lajes BubbleDeck® pelo Método dos Pórticos Equivalentes

Tipo de Laje	Altura (cm)	$M_{d,res} \text{ máx}$ (kN.m)	A_s (cm ² /m)	Flecha f_i (mm)	Flecha f_{dif} (mm)	Flecha f_{tot} (mm)
Cobertura	28	62,78	9,82	9,47	12,50	21,98
Térreo, 1° e 2° andar	28	76,59	12,27	16,86	22,26	39,12

7 RESULTADOS LAJES LISAS

Como já dito anteriormente, o parâmetro de comparação entre os dois tipos de laje será a flecha máxima. Para que se possa dimensionar a laje lisa, então, deve-se igualar os valores de flecha e, a partir disso, encontrar uma altura equivalente da laje lisa para o mesmo valor de deformação, alterando apenas o peso próprio e o coeficiente de rigidez da laje, que são os parâmetros que diferem uma laje lisa e uma laje BubbleDeck[®]. A altura equivalente é obtida através de método iterativo, por tentativas.

A deformação foi escolhida como parâmetro de comparação porque, em lajes lisas, ela é um dos principais fatores limitantes da estrutura, já que nesses tipos de sistemas estruturais ocorrem deslocamentos verticais de grande valor. Uma estrutura desse tipo pode resistir aos esforços solicitantes com eficiência, mas, se não tomado os devidos cuidados com a flecha, a estrutura se tonará inviável por estar fora dos limites estipulados pela norma. Por isso que é importante fazer uma previsão criteriosa e segura de suas flechas e igualando esse parâmetro para os dois tipos de laje, estaremos seguros quanto esse parâmetro.

7.1 DIMENSIONAMENTO UTILIZANDO O SOFTWARE TQS.

Com os valores das deformações da seção 6.1.6 iremos fazer interações por tentativas utilizando o *software* TQS até que se encontre uma altura de laje lisa que corresponda a mesma flecha da laje BubbleDeck[®].

Para dimensionar a laje lisa no TQS, foi habilitado a opção de cálculo automático do peso próprio e alterado o carregamento o carregamento, retirando-se a parcela que seria do peso próprio da laje. Portanto os valores de entrada para os carregamentos atuantes na laje lisa são:

- Carga permanente: alvenaria (2,4 kN/m²); revestimento de teto (0,38 kN/m²); contrapiso (0,84 kN/m²); piso (0,2 kN/m²);
- Carga acidental: carga de uso (2 kN/m²)

Também foi retirado o coeficiente de 0,9 multiplicando o módulo de rigidez (EI) da laje.

7.1.1 FLECHA E ALTURA EQUIVALENTE

Em anexo, encontra-se a planta de momentos da laje lisa da cobertura e das demais. A Tabela 7.1 a seguir mostra os valores do momento máximo positivo e as flechas encontrados para a laje lisa:

Tabela 7.1: valores correspondentes da laje lisa em relação à laje BubbleDeck[®] para a mesma flecha pelo TQS

Laje	Altura (cm)	M_d máx (kN.m)	A_s adot (cm ² /m)	Flecha f_i (mm)	Flecha f_{dif} (mm)	Flecha f_{tot} (mm)
Cobertura	30	65,3	8,27	5,71	7,53	13,24
Térreo, 1° e 2° andar	31	82,8	10,23	9,77	12,90	22,68

Como é possível observar, as flechas encontradas para a laje lisa são bem próximas das flechas encontradas para a laje BubbleDeck[®].

7.1.2 CÁLCULO DA ARMADURA

O cálculo da armadura positiva e negativa de flexão é o mesmo mostrado na seção 6.1.5. A Tabela 7.2 mostra os resultados encontrados:

Tabela 7.2: Áreas de aço e quantidade de ferro para momentos máximos da laje lisa pelo TQS

Laje	Armadura	M_d Máx (kN.m)	A_s requerido (cm ² /m)	Quantidade de barras	A_s adotado (cm ² /m)
Cobertura	Armadura positiva	91,4	8,25	Φ10,0 c.9	8,27
	Armadura negativa	297,6	33,43	Φ20,0 c.9	35,38
Térreo 1° e 2° andar	Armadura positiva	115,9	10,15	Φ12,5 c.12	10,23
	Armadura negativa	337,7	39,19	Φ20,0 c.8	39,25

7.2 DIMENSIONAMENTO UTILIZANDO O MÉTODO DIRETO

7.2.1 ESFORÇOS ENCONTRADOS

Os esforços encontrados para as lajes lisas pelo Método Direto foram obtidos de forma similar aos da laje do tipo BubbleDeck[®]. Para a laje lisa maciça o carregamento total atuante é de 13,32 kN/m² para as lajes de pavimento tipo e 10,72 kN/m² para as lajes de cobertura. Esses valores foram encontrados considerando que a laje possui 30 cm de altura, o cálculo para obter esse valor é mostrado no tópico seguinte.

As figuras e tabelas a seguir mostram os valores de momentos obtidos para a laje de pavimento tipo para cada uma das faixas de projeto definidas anteriormente.

Tabela 7.3. Dados e resultados para as lajes do térreo, 1º e 2º pavimento, na direção principal.

Faixa de Projeto	Vão	ℓ1	ℓ2	ℓn	Mo	Ma	Mb	Mc
FPx 1	1	7,00	3,60	6,50	253,25	-75,97	126,62	-177,27
	2	7,00	3,60	6,50	253,25	-164,61	88,64	-164,61
	3	7,00	3,60	6,50	253,25	-164,61	88,64	-164,61
	4	7,00	3,60	6,50	253,25	-164,61	88,64	-164,61
	5	7,00	3,60	6,50	253,25	-177,27	126,62	-75,97
FPx 2	1	7,00	7,00	6,50	492,42	-128,03	256,06	-344,70
	2	7,00	7,00	6,50	492,42	-320,08	172,35	-320,08
	3	7,00	7,00	6,50	492,42	-320,08	172,35	-320,08
	4	7,00	7,00	6,50	492,42	-320,08	172,35	-320,08
	5	7,00	7,00	6,50	492,42	-344,70	256,06	-128,03

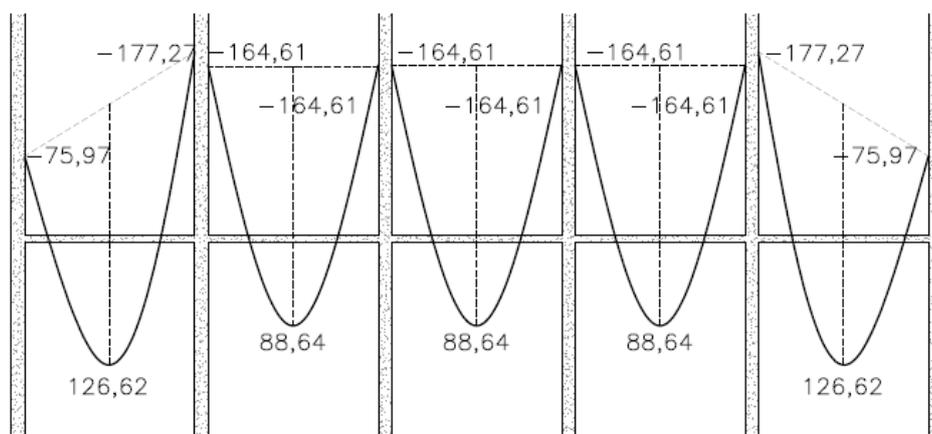


Figura 7.1. Momentos da faixa de projeto 1, na direção principal, para as lajes do térreo, 1º e 2º pavimento

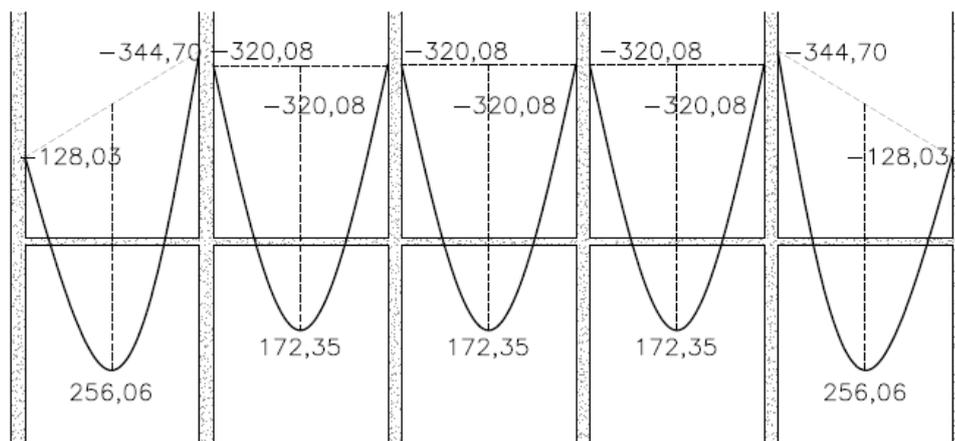


Figura 7.2. Momentos da faixa de projeto 2, na direção principal, para as lajes do térreo, 1º e 2º pavimento

Tabela 7.4. Dados e resultados para as lajes do térreo, 1º e 2º pavimento, na direção secundária.

Faixa de Projeto	Vão	ℓ_1	ℓ_2	ℓ_n	M_o	M_a	M_c	M_b
FPy 1	1	7,00	3,75	6,80	288,71	-86,61	144,36	-202,10
	2	7,00	3,75	6,80	288,71	-187,66	101,05	-187,66
	3	7,00	3,75	6,80	288,71	-202,10	144,36	-86,61
FPy 2	1	7,00	7,00	6,80	538,93	-140,12	280,24	-377,25
	2	7,00	7,00	6,80	538,93	-350,30	188,62	-350,30
	3	7,00	7,00	6,80	538,93	-377,25	280,24	-140,12

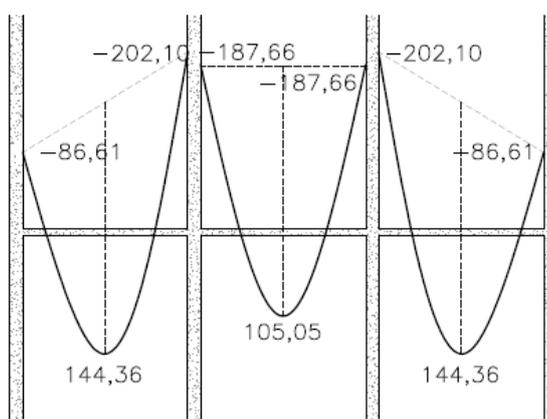


Figura 7.3. Momentos da faixa de projeto 1, na direção secundária, para as lajes do térreo, 1º e 2º pavimento

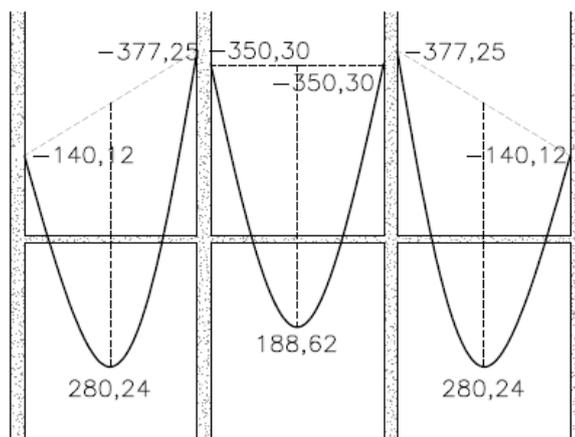


Figura 7.4. Momentos da faixa de projeto 2, na direção secundária, para as lajes do térreo, 1º e 2º pavimento

-73,16		-147,73		-137,18		-137,18		-147,73		-73,16		
P1	87,79	P2	59,09	P3	59,09	P4	59,09	P5	87,79	P6		Faixa do Pilares externos
0,00	21,71	-30,95	24,76	-28,74	24,76	-28,74	24,76	-30,95	21,71	0,00		Faixa Central externa
-21,71		-37,99		-35,27		-35,27		-37,99		-21,71		Faixa do Pilares internos
P7	21,71	P8	15,19	P9	15,19	P10	15,19	P11	21,71	P12		Faixa Central interna
0,00	14,47	-12,66	10,13	-11,76	10,13	-11,76	10,13	-12,66	14,47	0,00		Faixa do Pilares internos
-21,71		-37,99		-35,27		-35,27		-37,99		-21,71		Faixa Central externa
P13	21,71	P14	15,19	P15	15,19	P16	15,19	P17	21,71	P18		Faixa do Pilares externos
0,00	21,71	-30,95	24,76	-28,74	24,76	-28,74	24,76	-30,95	21,71	0,00		Faixa do Pilares externos
-73,16	87,79	-147,73	59,09	-137,18	59,09	-137,18	59,09	-147,73	87,79	-73,16		
P19		P20		P21		P22		P23		P24		

Figura 7.5. Resultados finais de momentos para o pavimento tipo na direção principal

-80,07	P19	96,08	-161,68	64,67	-161,68	96,08	P1	Faixa do Pilares externos
0,00		25,17	-34,16	17,08	-34,16	25,17	0,00	Faixa Central externa
-24,75	P20	24,75	-43,31	17,32	-43,31	24,75	P2	Faixa do Pilares internos
0,00		16,5	-14,44	11,55	-14,44	16,5	0,00	Faixa Central interna
-24,75	P21	24,75	-43,31	17,32	-43,31	24,75	P3	Faixa do Pilares internos
0,00		16,5	-14,44	11,55	-14,44	16,5	0,00	Faixa Central interna
-24,75	P22	24,75	-43,31	17,32	-43,31	24,75	P4	Faixa do Pilares internos
0,00		16,5	-14,44	11,55	-14,44	16,5	0,00	Faixa Central interna
-24,75	P23	24,75	-43,31	17,32	-43,31	24,75	P5	Faixa do Pilares internos
0,00		25,17	-34,16	17,08	-34,16	25,17	0,00	Faixa Central externa
-80,07	P24	96,08	-161,68	64,67	-161,68	96,08	P6	Faixa do Pilares externos

Figura 7.6. Resultados finais de momentos para o pavimento tipo na direção secundária

Para as lajes de cobertura que apresenta um carregamento total de 10,72 kN/m², os resultados são apresentados a seguir.

Tabela 7.5. Dados e resultados para as lajes da cobertura, na direção principal.

Faixa de Projeto	Vão	ℓ_1	ℓ_2	ℓ_n	M_o	M_a	M_b	M_c
FPx 1	1	7,00	3,60	6,50	203,81	-61,14	101,91	-142,67
	2	7,00	3,60	6,50	203,81	-132,48	71,33	-132,48
	3	7,00	3,60	6,50	203,81	-132,48	71,33	-132,48
	4	7,00	3,60	6,50	203,81	-132,48	71,33	-132,48
	5	7,00	3,60	6,50	203,81	-142,67	101,91	-61,14
FPx 2	1	7,00	7,00	6,50	396,31	-103,04	206,08	-277,41
	2	7,00	7,00	6,50	396,31	-257,60	138,71	-257,60
	3	7,00	7,00	6,50	396,31	-257,60	138,71	-257,60
	4	7,00	7,00	6,50	396,31	-257,60	138,71	-257,60
	5	7,00	7,00	6,50	396,31	-277,41	206,08	-103,04

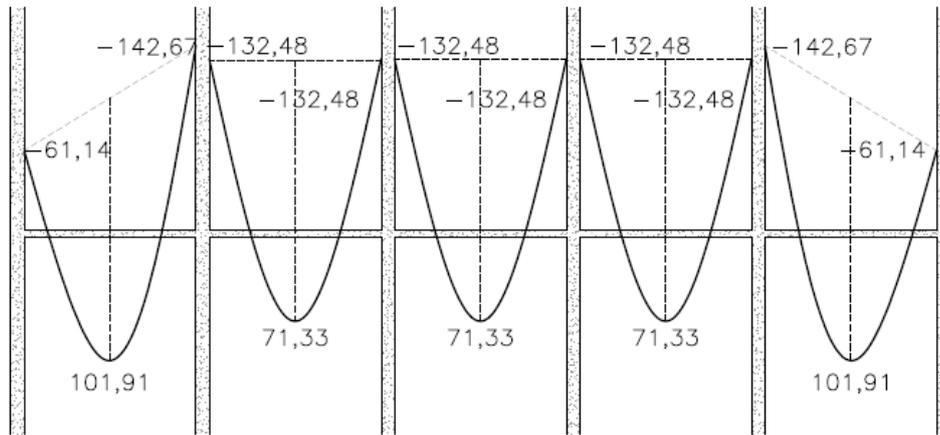


Figura 7.7. Momentos da faixa de projeto 1, na direção principal, para as lajes de cobertura

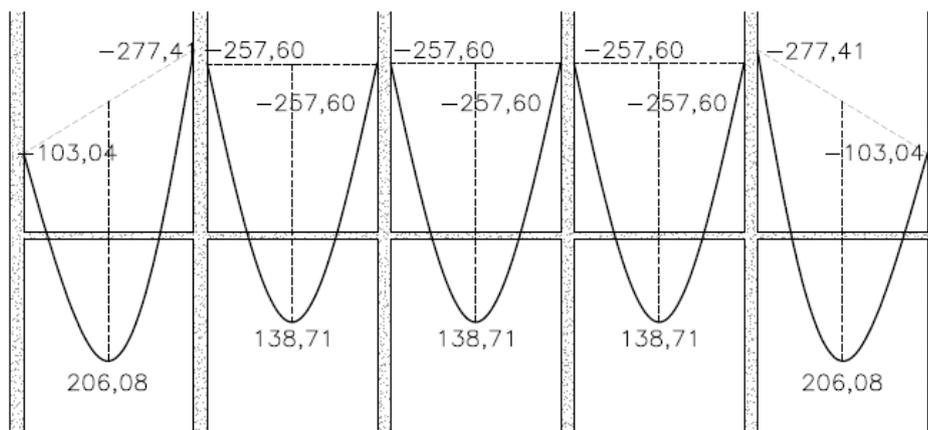


Figura 7.8. Momentos da faixa de projeto 2, na direção principal, para as lajes de cobertura

Tabela 7.6. Dados e resultados para as lajes da cobertura, na direção secundária.

Faixa de Projeto	Vão	ℓ_1	ℓ_2	ℓ_n	M_o	M_a	M_c	M_b
FPy 1	1	7,00	3,75	6,80	232,36	-69,71	116,18	-162,65
	2	7,00	3,75	6,80	232,36	-151,03	81,32	-151,03
	3	7,00	3,75	6,80	232,36	-162,65	116,18	-69,71
FPy 2	1	7,00	7,00	6,80	433,73	-112,77	225,54	-303,61
	2	7,00	7,00	6,80	433,73	-281,93	151,81	-281,93
	3	7,00	7,00	6,80	433,73	-303,61	225,54	-112,77

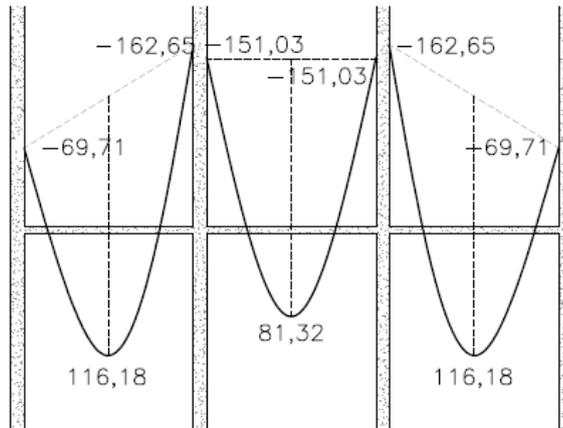


Figura 7.9. Momentos da faixa de projeto 1, na direção secundária, para as lajes de cobertura

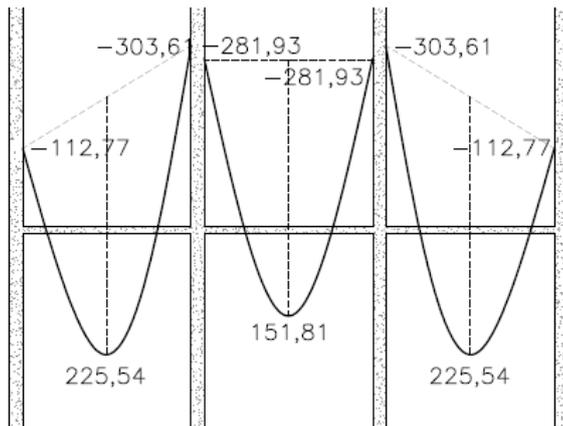


Figura 7.10. Momentos da faixa de projeto 2, na direção principal, para as lajes de cobertura

-58,88		-118,89		-110,40		-110,40		-118,89		-58,88	
P1	70,66	P2	47,56	P3	47,56	P4	47,56	P5	70,66	P6	
											Faixa do Pilares externos
0,00	29,38	-24,91	19,93	-23,13	19,93	-23,13	19,93	-24,91	29,38	0,00	Faixa Central externa
-17,47		-30,57		-28,39		-28,39		-30,57		-17,47	
P7	17,47	P8	12,23	P9	12,23	P10	12,23	P11	17,47	P12	
											Faixa do Pilares internos
0,00	11,65	-10,19	8,15	-9,46	8,15	-9,46	8,15	-10,19	11,65	0,00	Faixa Central interna
-17,47		-30,57		-28,39		-28,39		-30,57		-17,47	
P13	17,47	P14	12,23	P15	12,23	P16	12,23	P17	17,47	P18	
											Faixa do Pilares internos
0,00	29,38	-24,91	19,93	-23,13	19,93	-23,13	19,93	-24,91	29,38	0,00	Faixa Central externa
-58,88	70,66	-118,89	47,56	-110,40	47,56	-110,40	47,56	-118,89	70,66	-58,88	
P19		P20		P21		P22		P23		P24	
											Faixa do Pilares externos

Figura 7.11. Resultados finais de momentos para o pavimento cobertura na direção principal

-64,55		-130,12		-130,12		-64,55	
P19	77,33	P13	52,05	P7	77,33	P1	
							Faixa do Pilares externos
0,00	20,26	-27,50	13,75	-27,50	20,26	0,00	Faixa Central externa
-19,92		-34,85		-34,85		-19,92	
P20	19,92	P14	13,94	P8	19,92	P2	
							Faixa do Pilares internos
0,00	13,28	-11,62	9,29	-11,62	13,28	0,00	Faixa Central interna
-19,92		-34,85		-34,85		-19,92	
P21	19,92	P15	13,94	P9	19,92	P3	
							Faixa do Pilares internos
0,00	13,28	-11,62	9,29	-11,62	13,28	0,00	Faixa Central interna
-19,92		-34,85		-34,85		-19,92	
P22	19,92	P16	13,94	P10	19,92	P4	
							Faixa do Pilares internos
0,00	13,28	-11,62	9,29	-11,62	13,28	0,00	Faixa Central interna
-19,92		-34,85		-34,85		-19,92	
P23	19,92	P17	13,94	P11	19,92	P5	
							Faixa do Pilares internos
0,00	20,26	-27,50	13,75	-27,50	20,26	0,00	Faixa Central externa
-64,55	77,33	-130,12	52,05	-130,12	77,33	-64,55	
P24		P18		P12		P6	
							Faixa do Pilares externos

Figura 7.12. Resultados finais de momentos para o pavimento cobertura na direção secundária

7.2.2 FLECHAS E ALTURAS EQUIVALENTES

Por tentativa, encontramos os valores de altura da laje correspondente para a laje lisa para valores de flecha quase iguais para o método direto. As únicas alterações, como já dito antes foram na carga do peso próprio e a retirada do coeficiente de 0,9 multiplicando a rigidez da laje (EI) para o cálculo da flecha. A Tabela 7.7 a seguir mostra os valores encontrados.

Cabe ressaltar que os valores dos momentos resultantes utilizados para calcular as flechas foram provenientes da combinação de carga quase-permanente, assim como estipula a NBR 6118:2014.

Tabela 7.7: Valores correspondentes da laje lisa em relação à laje BubbleDeck® para a mesma flecha pelo Método Direto

Tipo de Laje	Altura (cm)	$M_{d,res\ máx}$ (kN.m)	A_s (cm ² /m)	Flecha f_i (mm)	Flecha f_{dif} (mm)	Flecha f_{tot} (mm)
Cobertura	32	69,5	9,44	4,23	5,58	9,82
Térreo, 1° e 2° andar	30	87,4	12,92	13,91	18,36	32,27

7.2.3 CÁLCULO DAS ARMADURAS

O cálculo da armadura positiva e negativa de flexão é o mesmo mostrado na seção 6.1.5. A Tabela 7.8 mostra os valores dos momentos máximos e as armaduras encontrados.

Tabela 7.8: Áreas de aço e quantidade de ferro para momentos máximos da laje lisa pelo Método Direto

Laje	Armadura	$M_d\ Máx$ (kN.m)	A_s requerido (cm ² /m)	Quantidade de barras	A_s adotado (cm ² /m)
Cobertura	Armadura positiva	104,9	8,80	Φ12,5 c.13	9,44
	Armadura negativa	176,3	18,18	Φ16,0 c.11	18,28
Térreo 1° e 2° andar	Armadura positiva	134,5	12,38	Φ12,5 c.9,5	12,92
	Armadura negativa	226,4	24,22	Φ16,0 c.8	25,13

7.3 DIMENSIONAMENTO UTILIZANDO O MÉTODO DO PÓRTICO EQUIVALENTE

O pórtico equivalente é definido conforme apresentado anteriormente, sendo que aqui a altura das vigas do pórtico é a espessura da laje lisa maciça.

O carregamento atuante para o pavimento tipo é de 13,32 kN/m², e o carregamento distribuído no pórtico é obtido considerando a faixa de projeto com 7 m. Os resultados para o pavimento tipo para cada uma das faixas de pilares da direção principal são apresentados na tabela 7.9 e 7.10 e nas figuras 7.13, 7.14 e 7.15 a seguir.

Tabela 7.9. Momentos de Referência para o Pavimento Tipo

Vão (m)	Carregamento distribuído (kN/m)	Momentos de Referência (kN.m)					
		Positivo Tramo externo	Positivo Tramo Interno	Positivo Tramo Central	Negativo Pilar externo	Negativo Pilar Interno	Negativo Pilares Centrais
7,00	93,24	209,50	189,00	190,60	316,00	409,10	380,50

Tabela 7.10. Momentos distribuídos nas faixas do Pavimento Tipo

Faixas	Momentos Positivos (kN.m)			Momentos Negativos (kN.m)		
	Tramo Externo	Tramo Interno	Tramo Central	Pilar Externo	Pilar Interno	Pilar Central
Faixa externa	57,61	51,98	52,42	118,50	153,41	142,69
Faixa interna	94,28	85,05	85,77	79,00	102,28	95,13

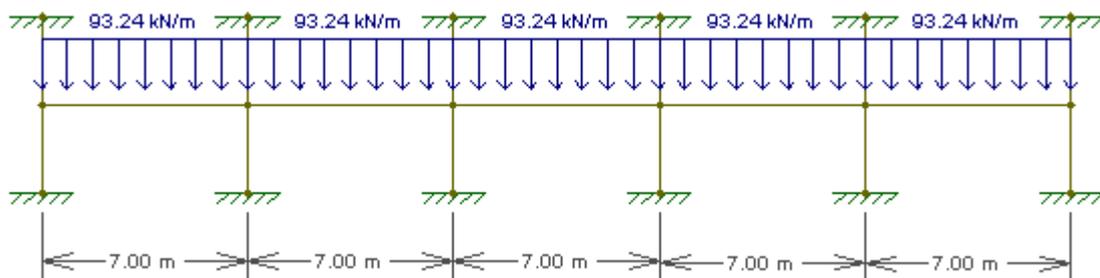


Figura 7.13. Pórtico Equivalente para Pavimento Tipo

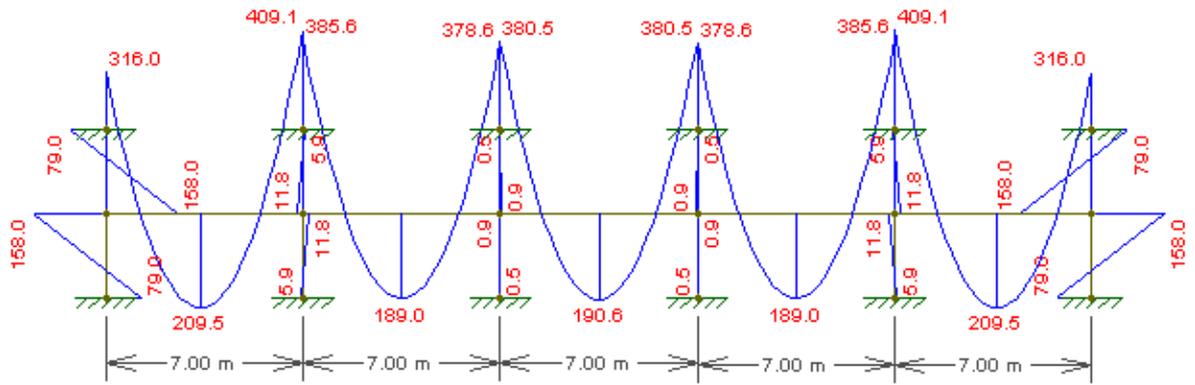


Figura 7.14. Diagrama de Momentos Fletores de Referência para Pórtico P1 do Pavimento tipo

-118,50	57,61	-153,41	51,98	-142,69	52,42	-142,69	51,98	-153,41	57,61	-118,50
P1		P2		P3		P4		P5		P6
-79,00		-102,28		-95,13		-95,13		-102,28		-79,00
	94,28		85,05		85,77		85,05		94,28	
-118,50	57,61	-153,41	51,98	-142,69	52,42	-142,69	51,98	-153,41	57,61	-118,50
P7		P8		P9		P10		P11		P12

Figura 7.15. Resultados finais para Pórtico Equivalente do Pavimento Tipo

A seguir os resultados para laje de cobertura.

Tabela 7.11. Momentos de referência para o pavimento cobertura

Vão (m)	Carregamento distribuído (kN/m)	Momentos de Referência (kN.m)					
		Positivo Tramo externo	Positivo Tramo Interno	Positivo Tramo Central	Negativo Pilar externo	Negativo Pilar Interno	Negativo Pilares Centrais
7,00	75,04	181,90	150,30	154,00	216,30	343,50	305,60
7,00	75,04	181,90	150,30	154,00	216,30	343,50	305,60

Tabela 7.12. Momentos distribuídos nas faixas para Laje de Cobertura

Faixas	Momentos Positivos (kN.m)			Momentos Negativos (kN.m)		
	Tramo Externo	Tramo Interno	Tramo Central	Pilar Externo	Pilar Interno	Pilar Central
Faixa externa	50,02	41,33	42,35	81,11	128,81	114,60
Faixa interna	81,86	67,64	69,30	54,08	85,88	76,40

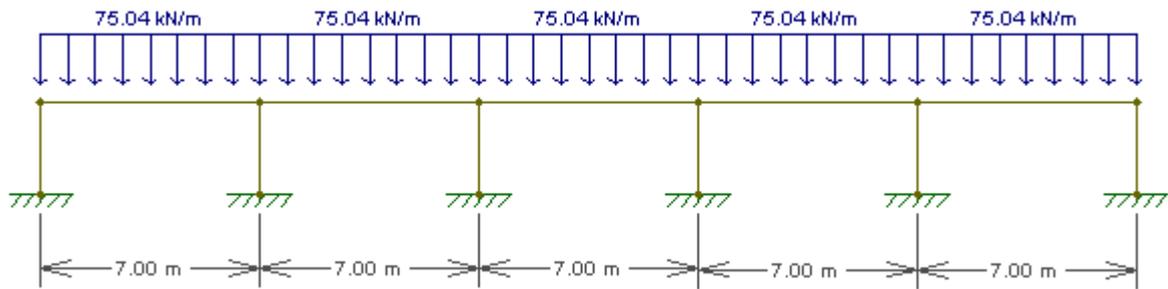


Figura 7.16. Pórtico Equivalente P1 para Pavimento Cobertura

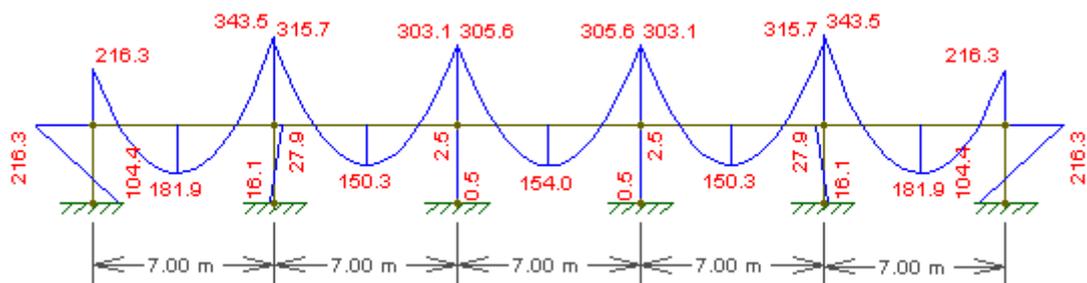


Figura 7.17. Momentos Fletores Pórtico Equivalente P1 Pavimento Cobertura

-81,11	50,02	-128,81	41,33	-114,60	42,35	-114,60	41,33	-128,81	50,02	-81,11
P1		P2		P3		P4		P5		P6
-54,08		-85,88		-76,40		-76,40		-85,88		-54,08
	81,86		67,64		69,30		67,64		81,86	
-81,11	50,02	-128,81	41,33	-114,60	42,35	-114,60	41,33	-128,81	50,02	-81,11
P7		P8		P9		P10		P11		P12

Figura 7.18. Momentos Finais para a Laje de Cobertura pelo Método do Pórtico Equivalente

7.3.1 FLECHAS E ALTURAS EQUIVALENTES

Por processo iterativo, encontramos os valores de altura da laje correspondente para a laje lisa utilizando os valores de momento encontrados para o método do pórtico equivalente e comparando com a flecha encontrada para a laje BubbleDeck[®]. A Tabela 7.7 a seguir mostra os valores encontrados. Cabe ressaltar que os valores dos momentos resultantes utilizados para calcular as flechas foram provenientes da combinação de carga quase-permanente, assim como estipula a NBR 6118:2014.

Tabela 7.13: Valores correspondentes da laje lisa em relação à laje BubbleDeck® para a mesma flecha pelo Método dos Pórticos Equivalentes

Tipo de Laje	Altura (cm)	$M_{d,res\ máx}$ (kN.m)	A_s (cm ² /m)	Flecha f_i (mm)	Flecha f_{dif} (mm)	Flecha f_{tot} (mm)
Cobertura	30	81,86	11,04	11,82	15,60	27,42
Térreo, 1° e 2° andar	30	94,28	12,27	17,27	22,79	40,06

Os valores das flechas para o método do pórtico equivalente entre os dois tipos de laje têm uma pequena variação, porém adotando um valor superior de altura de laje (31 cm) as discrepâncias nos valores são maiores, portanto adota-se uma laje de 30 cm.

7.3.2 CÁLCULO DAS ARMADURAS

O cálculo da armadura positiva e negativa de flexão é o mesmo mostrado na seção 6.1.5. A Tabela 7.8 mostra os valores dos momentos máximos e as armaduras encontrados.

Tabela 7.14: Áreas de aço e quantidade de ferro para momentos máximos da laje lisa pelo Método dos Pórticos Equivalentes

Laje	Armadura	$M_d\ Máx$ (kN.m)	A_s requerido (cm ² /m)	Quantidade de barras	A_s adotado (cm ² /m)
Cobertura	Armadura positiva	114,6	9,65	Φ12,5 c.12	11,04
	Armadura negativa	180,3	18,65	Φ16 c.10	20,11
Térreo 1° e 2° andar	Armadura positiva	132,0	12,13	Φ12,5 c.10	12,27
	Armadura negativa	214,8	22,70	Φ16 c.8	26,14

8 ANÁLISE COMPARATIVA

Os parâmetros a serem comparados entre a estrutura utilizando laje com vazios do tipo BubbleDeck® e a estrutura adotando laje lisa maciça serão: taxa de armadura, volume de concreto, flechas e momentos característicos máximos. Serão comparados ainda os métodos de cálculo utilizados neste projeto – método direto, método dos pórticos equivalentes e utilização do TQS – mostrando a precisão de cada um deles e a discrepância dos resultados entre si.

8.1 TAXAS DE ARMADURA

A seguir serão demonstrados o cálculo para a obtenção das taxas para a laje BubbleDeck® e para a laje lisa nos seus respectivos métodos de dimensionamento. As taxas de armadura foram calculadas a partir da armadura adotada.

Para a laje BubbleDeck® dimensionada no TQS, foram obtidas as seguintes taxas:

Para a laje de Cobertura:

- Armadura de flexão inferior:

$$\rho = \frac{7,85}{28.100} \times 100 = 0,28\%$$

- Armadura de flexão superior:

$$\rho = \frac{28,64}{28.100} \times 100 = 1,02\%$$

Para as demais lajes (térreo, 1º e 2º andar):

- Armadura de flexão inferior:

$$\rho = \frac{9,44}{28.100} \times 100 = 0,33\%$$

- Armadura de flexão superior:

$$\rho = \frac{35,38}{28.100} \times 100 = 1,26\%$$

O cálculo é o mesmo para a laje lisa e para os demais métodos. As tabelas Tabela 8.1e Tabela 8.2 a seguir resume os resultados das taxas de armadura para as lajes:

Tabela 8.1: Taxa de armadura das lajes BubbleDeck®

Método	TQS		Método Direto		Pórtico Equivalente	
	Cobertura (%)	Térreos 1° e 2° andar (%)	Cobertura (%)	Térreos 1° e 2° andar (%)	Cobertura (%)	Térreos 1° e 2° andar (%)
Lajes						
Armadura Positiva	0,28	0,33	0,28	0,40	0,35	0,44
Armadura Negativa	1,02	1,26	0,46	0,72	0,57	0,72

Tabela 8.2: Taxa de armadura das lajes lisas

Método	TQS		Método Direto		Pórtico Equivalente	
	Cobertura (%)	Térreos 1° e 2° andar (%)	Cobertura (%)	Térreos 1° e 2° andar (%)	Cobertura (%)	Térreos 1° e 2° andar (%)
Lajes						
Armadura Positiva	0,28	0,33	0,30	0,43	0,37	0,41
Armadura Negativa	1,18	1,27	0,57	0,84	0,67	0,87

Diante dos resultados apresentados, pode-se notar que, em geral, a taxa de armadura é maior nas lajes lisas em comparação com as lajes do tipo BubbleDeck®, para todos os métodos utilizados, o que mostra a vantagem desta em relação à primeira.

Comparando-se os métodos entre si, nota-se que o TQS possui valores de taxa de armadura ligeiramente menores em comparação aos métodos manuais quando comparados a armadura **positiva**. Os valores do método direto podem chegar a ser 30% maiores em relação ao TQS, no caso comparando a laje de cobertura do tipo BubbleDeck®. Porém, quando se trata das taxas de consumo de aço das armaduras negativas, os resultados do TQS são maiores em até 121% em relação ao Método Direto, comparando a laje das coberturas da BubbleDeck®, e em até 78,95% em relação ao método do pórtico equivalente. A explicação está no fato de que, como será explicado na seção 8.4, os momentos negativos encontrados pelo TQS são muito maiores que os encontrados pelos métodos manuais. Já comparando os métodos manuais entre-si, pode-se notar que apresentam resultados bem próximos.

8.2 VOLUME DE CONCRETO

O volume de concreto total é obtido retirando-se da região onde há esferas o volume das mesmas. O cálculo do volume da laje BubbleDeck[®] já foi feito na seção 6.1.1, na Tabela 6.3. A Tabela 8.3 a seguir mostra o consumo de concreto das lajes BD e para as lajes lisas em seus respectivos métodos de dimensionamento. Também mostra o aumento em porcentagem do consumo da laje lisa em relação à laje BubbleDeck[®].

Tabela 8.3: Volume de concreto das lajes e aumento em relação à BubbleDeck[®]

Laje	Volume de concreto (m ³)		Aumento em relação à laje BD (%)	
	Cobertura	Térreos 1° e 2° andar	Cobertura	Térreos 1° e 2° andar
BubbleDeck [®]	151,42	155,19	-	-
Lisa - TQS	225,78	233,31	49,10	50,33
Lisa - Método Direto	240,83	225,78	59,05	45,49
Lisa - Pórtico Equivalente	225,78	225,78	45,49	45,49

Pode-se notar um significativo aumento no consumo de concreto entre a laje BubbleDeck[®] e a laje lisa em geral, com valores de laje lisa variando de 49% a 50%, dependendo da laje, a mais de consumo de concreto quando comparado a laje lisa pelo TQS, 45% e a 59% comparando com a laje lisa pelo Método Direto e de 45% pelo Método do Pórtico Equivalente. O consumo de concreto entre os métodos para a laje lisa é variável já que, para alcançar valores de deformações iguais, as lajes possuem espessuras variáveis. Analisando os métodos entre si, não houve um método que se sobressaiu em relação aos outros. Para a laje de cobertura, o TQS e o pórtico equivalente apresentaram o mesmo consumo, e para a laje do térreo, a do pórtico e a do método direto apresentaram menor consumo. Essa variação ocorre devido à variação da espessura da laje para que se conseguisse igualar a deformação da laje BubbleDeck.

8.3 FLECHAS

Primeiramente foram calculados os valores de flecha para a laje BubbleDeck® com altura de 28 cm, em seguida, buscou-se aproximar o máximo as flechas para as lajes lisas maciças em cada um dos métodos, para a partir daí, definir uma altura para a laje lisa. Como pode se observar nos resultados de cada tipo de laje para cada um dos métodos, a laje lisa maciça solicitou uma espessura de 30 cm para que apresentasse valores de flecha similares aos da laje BubbleDeck®. As Tabela 8.4 e Tabela 8.5 a seguir mostram o comparativo entre as flechas calculadas pelos diferentes métodos:

Tabela 8.4. Flecha Total (mm) para as lajes BubbleDeck® nos três métodos adotados

	TQS	Método Direto	Pórtico equivalente
Cobertura	12,40	10,21	21,98
Térreos 1° e 2° andar	24,32	31,02	39,12

Tabela 8.5. Flecha Total (mm) para as lajes .

	TQS	Método Direto	Pórtico equivalente
Cobertura	13,25	9,82	27,42
Térreos 1° e 2° andar	22,68	32,27	40,06

Comparando os métodos entre si, as flechas encontradas diferem bastantes umas das outras, principalmente para as lajes do térreo, 1° e 2° andar, variando em até 28% quando comparados o TQS em relação ao método direto e 76,7% em relação ao método dos pórticos equivalentes. Esses valores diferem por causa da discrepância dos momentos máximos encontrados em cada uma das lajes, sendo que os valores encontrados no software são mais precisos, por se tratar de um cálculo computacional. Nota-se também que, comparando os métodos manuais, o método do pórtico equivalente apresenta flechas bastante superiores em relação às do método direto, com valores que superam em até 115% para a BubbleDeck® e 179% para a lisa.

Segundo a NBR 6118:2014 → Tabela 13.2, o valor limite para deslocamento é de $l/250$, sendo $l = 7 m$, temos 28 mm como valor limite. Portanto, segundo a norma, apenas as lajes calculadas para o TQS passaram.

8.4 MOMENTOS FLETORES

Outro parâmetro a ser analisado são os momentos máximos atuantes nas lajes para um valor de flecha equivalente. A tabela 8.6 a seguir mostra os momentos máximos atuantes, positivos e negativos, nas lajes lisas e BubbleDeck®

Tabela 8.6. Momentos característicos máximos (kN.m) atuantes nas lajes BubbleDeck® e lisa maciça para os três métodos de dimensionamento.

	Método	TQS		Método Direto		Pórtico equivalente	
	Momentos	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo
Laje BubbleDeck®	Cobertura	53,3	176,2	53,2	86,9	62,78	98,78
	Térreos 1° e 2° andar	64,3	213,4	78,4	131,3	76,59	124,65
Laje Lisa	Cobertura	63,5	212,6	74,9	125,9	81,86	128,81
	Térreos 1° e 2° andar	82,8	240,9	96,1	161,7	94,28	153,41

Analisando primeiramente os momentos entre as lajes BubbleDeck® e as lajes lisas, nota-se, como havia de se esperar, que os momentos máximos para a laje lisa são superiores, para a mesma flecha. Para o dimensionamento no TQS, os valores variam em cerca de 13% (pavimento tipo) para o momento negativo à 20% (cobertura) e de 19% (cobertura) à 29% (pavimento tipo), para os momentos positivos. Já para os momentos do Método Direto, em relação aos momentos negativos, as diferenças são de 23% (pavimento tipo) até de 23% (cobertura), e para o momento positivos, de 22% (pavimento tipo) à 40% (cobertura). Para o pórtico equivalente as diferenças são de 30,40% (cobertura), 23,07% (pavimento tipo). Tais valores se justificam pela espessura elevada da laje lisa necessária para que se obtenha a mesma flecha, gerando assim mais carregamento, e por consequência, maiores esforços.

Analisando os valores obtidos entre os métodos, podemos notar que, para os momentos positivos, foram obtidos valores relativamente próximos entre eles, variando de 0,1% a 16% entre o TQS e o Método Direto, 13,8% a 28,9% entre o TQS e o pórtico equivalente e 1,9% a 18% entre o Método Direto e o método do Pórtico equivalente.

Os métodos manuais trazem momentos maiores, o que já era de se esperar, por serem métodos simplificados, aproximados, trabalhando em favor da segurança. O TQS traz valores

mais precisos, por ser um método computacional, o que torna o projeto mais econômico em abrir mão da segurança.

Em relação aos momentos negativos, podemos observar uma grande variação quando comparado os momentos obtidos pelo TQS em relação aos outros, tendo aumentos que pode ir de 48% até 95% quando comparado com o Método Direto e de 57% até 78,4% comparado ao Pórtico equivalente. Supõe-se que tais variações sejam pelo fato de que o TQS, sendo um método mais preciso, considere melhor a interação entre os componentes da estrutura (lajes, vigas e pilares) e as reações entre pilares e lajes, regiões em que ocorrem os máximos momentos negativos, e estas considerações não estão claras nos métodos manuais.

Comparando o método direto com o do pórtico equivalente, nota-se que não há predominância de um método para os maiores valores de momentos, havendo uma alternância entre eles, e seus valores são bem próximos. Por isso não é possível dizer qual dos métodos apresentam maiores valores.

9 CONCLUSÕES

O estudo bibliográfico mostrou que há vários sistemas construtivos de lajes com vazios que estão sendo utilizados no cenário nacional e internacional, com a ideia de apresentar soluções que tragam desempenho adequado gerando uma redução de consumo de concreto para alcançar vãos maiores e, portanto, layouts mais flexíveis.

O caso especial em estudo, a laje BubbleDeck[®], apresenta na bibliografia estudada uma série de vantagens, apresentando, inclusive, resultados de testes desenvolvidos em instituições acadêmicas. As vantagens também podem ser observadas nos projetos já executados utilizando esse sistema construtivo em todo o mundo.

Ao realizar análise comparativa com relação aos parâmetros taxa de armadura, volume de concreto, deflexões e momentos característicos máximos utilizando as considerações citadas no dimensionamento de lajes BubbleDeck[®] (redução do peso próprio do elemento estrutural, alteração na deflexão e resistência ao cisalhamento), observou-se melhor desempenho no uso desta laje quando comparada a uma laje lisa maciça.

Com relação a espessura da laje, foi necessária uma laje lisa maciça de 30 cm para que esta apresentasse as mesmas deflexões que a laje com vazios escolhida, do tipo BD 285, com 28 cm de espessura. O que mostra que a laje BubbleDeck[®] apresenta grandes vantagens com relação à rigidez.

Este valor elevado para a altura da laje, acarretou um aumento significativo no consumo de concreto, o que gerou ainda um aumento expressivo no peso próprio da mesma, gerando valores bem maiores para os esforços e solicitando uma maior quantidade de armadura.

Com relação aos métodos estudados, nota-se que o uso de método computacional, no caso, o *software* CAD/TQS traz valores mais precisos que os métodos manuais (Método Direto e Método do Pórtico Equivalente), o que, em geral, torna o projeto mais econômico sem abrir mão da segurança. No entanto, com relação aos momentos nos pilares, observou-se que o método computacional apresentou valores superiores aos encontrados nos métodos manuais, e, supõe-se que é devido à maior precisão ao considerar as ligações laje-pilar.

Conclui-se, por fim, que dentre os parâmetros estudados, a laje BubbleDeck[®] apresenta um melhor desempenho quando comparada a uma laje lisa maciça com deflexões equivalentes. Como sugestão para trabalhos futuros, pode ser feito um estudo complementar comparativo entre os dois tipos de laje analisando a resistência de cisalhamento e o fenômeno de punção, analisando os métodos de cálculos abordados nesse trabalho.

CRONOGRAMA

CRONOGRAMA DE ATIVIDADES									
Atividades	Abr 2015	Mai 2015	Jun 2015	Jul 2015	Ago 2015	Set 2015	Out 2015	Nov 2015	Dez 2015
Definição do tema	X								
Introdução	X								
Revisão Bibliográfica		X							
Metodologia		X							
Entrega PF1			X						
Defesa PF1			X						
Correções da banca				X	X				
Cálculo dos dados					X	X			
Análise dos dados							X	X	
Considerações finais									X
Entrega PF2									X
Defesa PF2									X

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRDECK, Bridging architecture, stability and technics

AIRDECK, disponível em < <http://www.airdeck.com>>, acesso em: 22 de abril de 2015

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 318, *Bulding Code Requirements for Structural Concrete*, Detroit, 2014

ARANTES, MARCELO L. Análise de produtividade de lajes do tipo Bubbledeck®. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96 p. 2013

ARAÚJO, J. M.; Curso de concreto armado 4, 3ª edição, Rio Grande do Sul: Dunas, 2010.

ASAVOAIE, C., CALIN, S., *Method for bubbledeck concrete slab with gaps*, *Universitatea Tehnica, Gheorghe Asachi din Iasi Tomul LV (LIX), Fasc. 2*, 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

BRANCO, A. F. V. C.; Contribuição para o projeto de lajes-cogumelo, Dissertação de mestrado, Departamento de estruturas, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 217p. 1989.

BUBBLEDECK BRASIL, disponível em<<http://www.bubbledeckbrasil.com.br>>, acesso em: 15 de abril de 2015

BUBBLEDECK INTERNACIONAL, Bubbledeck Design Guide, disponível em <<http://www.bubbledeck-uk.com>>, acesso em: 15 de abril de 2015

BUBBLEDECK, Calculation, Denmark, 2008

BUBBLEDECK, *Product Introduction. United Kingdom*, 2008.

BUBBLEDECK, Resultados de Ensaios e Estudos, Brasília, Brasil, 2013.

BUBBLEDECK, *Technical information sheet 2 – Thermal, Jersey, Channel Islands*, 2005.

BUBBLEDECK, Tipos de lajes Bubbledeck, 2014

CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. Cálculo e Detalhamento de estruturas usuais de concreto armado 2, 2ª edição, São Paulo: Pini, 2013. 617p

CHURAKOV, A. *Biaxial hollow slab with innovative types of voids*, Saint-Petersburg Polytechnical University, 29 Polytechnicheskaya st., St.Petersburg, Russia, 2014

CLÍMACO, J. C. T. S., Estrutura de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação, 2ª edição, 1º reimpressão, Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2013. 410p.

COBIAX, Lightweight concrete slabs, disponível em < <http://www.cobix.com>>, acesso em: 22 de abril de 2015

COBIAX, Manual técnico Cobiax, Ferca, disponível em < <http://www.ferca.pt/pt/entrada-dos-produtos/entrada-cobiax>>, acesso em 22 de abril de 2015.

CUNHA, A. J. P.; SOUZA, V. C. M., Lajes em concreto armado e protendido. Niterói, Eduff, 1994.

FREIRE, T. C., Estudo comparativo para lajes cogumelo utilizando as tecnologias “bubbledeck” e atex. Monografia de Projeto Final, Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas, Universidade Católica de Brasília, Taguatinga, DF, 2009.

LÁRUSSE, L. H.; FISHER, G. JÖNSSON, J., *Prefabricated floor panels composed of fiber reinforced concrete and a steel substructure*, Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, Brovej, Lyngby, Denmark. 2012.

MIGLIORE, G. M.. Dimensionamento e utilização de laje alveolar protendida. Monografia (Graduação). Barretos: UNIFEB. 2008

SCHNELLENBACH-HELD, M.; PFEFFER, K.; *Punching behavior of biaxial hollow slabs*, Institute for Concrete Structures and Materials, Darmstadt University of Technology, Alexanderstr. Darmstadt, Germany. 2002

SILVA, YURI M. O., Estudo comparativo entre lajes “bubbledeck” e lajes lisas, Projeto de Graduação, Rio de Janeiro, UFRJ, Escola Politécnica, 2011.

TQS informática ltda. *Software CAD para cálculo Estrutural de Concreto*. V.14 EPP +. São Paulo, SP, Brasil

U-BOOT, u-boot benton: Forma perdida para estruturas leves de concreto realizadas na obra, disponível em , <<http://en.daliform.com/>>, acesso em 23 de abril de 2015

ANEXOS