



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**Curso de Engenharia Civil**  
**Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas**

**ESTUDO COMPARATIVO PARA LAJES COGUMELO UTILIZANDO AS  
TECNOLOGIAS “BUBBLEDECK” E ATEX**

**TAMARA CARVALHO FREIRE**

Projeto de Graduação apresentado ao corpo docente do Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovado por:

---

Cláudia Ribeiro Eboli  
Prof. Associado, D.Sc., EP/UFRJ  
(Orientadora)

---

Francisco José Costa Reis  
Prof. Assistente, M.Sc., EP/UFRJ  
(Orientador)

---

Henrique Innecco Longo  
Prof. Associado, D.Sc., EP/UFRJ

Agosto/2009

## Resumo

O presente projeto de graduação tem por objetivos avaliar e comparar o novo tipo de laje *bubbledeck* apresentado neste projeto com uma laje nervurada, solução já corrente no Brasil para a redução no consumo de concreto. Foi apresentada também uma obra com a nova solução. O projeto foi desenvolvido de forma a servir como material didático de apoio para estudos futuros.

A parte inicial do projeto apresenta uma visão geral não somente dos conceitos básicos para a nova solução em laje apresentada, como também algumas características que servem de guia para o dimensionamento. Na continuação do trabalho, é apresentado, em detalhes, o dimensionamento das duas tecnologias de laje estudadas (*Bubbledeck e Atex*).

Em seguida, são apresentadas as características da obra utilizada como exemplo para demonstração do processo executivo da laje *bubbledeck*.

Por fim, são apresentados os comparativos entre as duas soluções de lajes planas biaxiais – “tipo cogumelo”.

## Sumário

Título	Página
1. Introdução.....	5
2. Histórico.....	7
2.1 BubbleDeck no Mundo .....	7
2.2 <i>BubbleDeck</i> no Brasil.....	8
3. Revisão Bibliográfica.....	9
3.1 Conceitos.....	9
3.2 Características para o dimensionamento da laje <i>bubbledeck</i> .....	12
3.3 Testes de avaliação.....	13
4. Descrição do primeiro pavimento <i>bubbledeck</i> no Brasil .....	16
4.1 Projeto original.....	16
4.2 Projeto utilizando a tecnologia <i>bubbledeck</i> .....	16
4.2.1 Descrição do projeto.....	16
4.3 Etapa construtiva.....	17
5. Dimensionamento – laje <i>bubbledeck</i> .....	24
5.1 Modelo Matemático .....	24
5.2 Carregamentos e Combinações .....	26
5.2.1 Peso Próprio .....	26
5.2.2 Sobrecarga – “SC” .....	26
5.2.3 Revestimento – “REV” .....	26
5.2.4 Divisórias – “DIV”.....	26
5.2.5 Combinação de Carregamentos.....	26
5.3 Esforços encontrados.....	27
5.4 Flecha encontrada.....	28
5.5 Dimensionamento da laje <i>bubbledeck</i> .....	29
5.5.1 Armadura inferior do painel – trecho mais solicitado.....	29

	4
5.5.2 Armadura superior do painel.....	30
5.5.3 Armadura superior na região sobre os pilares - trecho mais solicitado .....	30
5.5.4 Determinação da região de laje maciça para o pilar central.....	30
5.5.5 Armadura superior de ligação entre os painéis – trecho menos solicitado .....	33
6. Dimensionamento - laje nervurada “ATEX” .....	34
6.1 Modelo Matemático .....	34
6.2 Carregamentos e Combinações .....	35
6.3 Esforços encontrados.....	36
6.4 Flecha encontrada.....	37
6.5 Dimensionamento da laje nervurada .....	37
6.5.1 Armadura inferior.....	37
6.5.2 Armadura superior na região sobre os pilares – trecho mais solicitado.....	38
6.5.3 Determinação da região de laje maciça.....	39
6.5.4 Armadura superior entre painéis – trecho menos solicitado .....	41
7. Taxas e Comparativos .....	43
8. Conclusões .....	46
Bibliografia.....	47
ANEXOS 1 .....	48
ANEXOS 2.....	49
ANEXOS 3.....	50
ANEXOS 4.....	51
ANEXOS 5.....	52

## 1. Introdução

A escolha do tema para o este projeto de graduação teve como motivação a apresentação e avaliação de um novo tipo de laje, ainda recente no Brasil, com o intuito também de divulgá-lo como uma nova opção para soluções em lajes planas biaxiais – “tipo cogumelo”.

O projeto tem como objetivos: o dimensionamento de 2 soluções para um painel de laje *bubbledeck* e nervurada Atex, além de uma comparação quantitativa e qualitativa das duas soluções. A análise foi realizada com auxílio do programa de análise por Elementos Finitos SAP2000 v.10. Documentar um caso real de uma obra em lajes *bubbledeck*, acompanhada pela autora deste projeto,. O projeto foi desenvolvido de forma a servir como material didático de apoio para estudos futuros.

O assunto é abordado em três etapas. A primeira etapa consiste da apresentação dos conceitos básicos de lajes cogumelo, da laje *bubbledeck* e dos aspectos construtivos. A segunda etapa apresenta as características e a execução de uma obra com solução em laje *bubbledeck*. A terceira etapa compreende a modelagem e o dimensionamento e comparativo das lajes *bubbledeck* e nervurada.

O projeto é desenvolvido nos seguintes capítulos:

Capítulo 2: Apresentação de um breve histórico da laje *bubbledeck* no mundo e no Brasil.

Capítulo 3: Apresentação dos conceitos básicos de lajes cogumelo, lajes *bubbledeck* e nervurada, apresentação das características da laje *bubbledeck* e um guia para seu dimensionamento.

Capítulo 4: Apresentação da primeira obra em lajes *bubbledeck* no Brasil, características do projeto original e do projeto *bubbledeck*. Neste capítulo também são apresentadas em fotos, as etapas construtivas da obra.

Capítulo 5: Dimensionamento da laje *bubbledeck* escolhida, apresentando o modelo numérico, os esforços e o dimensionamento das armaduras principais.

Capítulo 6: Dimensionamento da laje nervurada escolhida, apresentando o modelo numérico, os esforços e o dimensionamento das armaduras principais.

Capítulo 7: Comparativo entre as duas soluções de lajes dimensionadas em capítulos anteriores.

Capítulo 8: Este capítulo apresenta as conclusões e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

## 2. Histórico

A seguir apresenta-se um breve histórico sobre as lajes *Bubbledeck* no mundo e no Brasil.

### 2.1 BubbleDeck no Mundo

O conceito de lajes ocas não é recente, sendo o concreto um material que não trabalha bem sob tensões à tração. Assim houve alguns estudos para otimizar o uso do concreto, utilizando-o onde realmente estaria funcionando, suportando tensões de compressão.

Em meados da década de 1980, o governo dinamarquês apoiou um concurso nacional que buscava desenvolver as melhores idéias para construções diferenciadas no futuro que deveriam ser flexíveis e aplicáveis em larga escala, além de se obter uma melhor solução ecológica e econômica. Foi nesse contexto que o engenheiro dinamarquês Jorgen Beuning começou a desenvolver as lajes *Bubbledeck*. (Beuning, K., 2009)

*BubbleDeck*, laje de concreto biaxial com vazios em função do uso de esferas de plásticas, é geralmente dimensionada utilizando-se os métodos convencionais para lajes maciças, de acordo com a norma alemã DIN 1045 (2001) para construções em concreto armado. A solução com lajes *Bubbledeck* também se encontra em normas de padronização como a norma britânica EN 13747 (2005).

A primeira obra a ser construída com as lajes *Bubbledeck* foi a Millennium Tower, na cidade de Rotterdam na Holanda. O projeto foi feito prevendo lajes ocas tubadas mas antes do início da construção, decidiu-se utilizar o novo conceito de lajes *Bubbledeck*. Mesmo com esta mudança de última hora o projeto foi terminado antes do tempo, devido a uma redução dos ciclos dos andares que passou de 10 para 4 dias. Adotar *Bubbledeck* significou também uma redução no pé direito devido a não utilização de vigas, diminuindo a altura geral da construção. Na metade da construção, foi decidida a adição de 2 andares em relação ao projeto inicial, o que só foi possível pela redução de altura da construção e do peso próprio dos pavimentos devido ao uso das lajes *Bubbledeck*. Após terminada, no ano 2000, a *Millennium Tower* era a segunda maior construção na Holanda, com 149m e 35 andares. (site *Wikipedia – Millennium Tower*, acessado em 06/2009)

Na Dinamarca e na Holanda, nos últimos sete anos, mais de 1 milhão de metros quadrados de lajes *BubbleDeck* já foram construídos em diferentes tipos de construções com múltiplos pavimentos. (Beuning, K., 2009)

## **2.2 *BubbleDeck* no Brasil**

A primeira obra a ser realizada com o conceito de lajes *Bubbledeck* no Brasil está sendo executada durante o desenvolvimento deste trabalho. A construção se localiza na cidade de Salvador, Bahia, e será a nova sede da empresa Odebrecht. A solução em laje *Bubbledeck* foi escolhida após a execução do projeto inicial, quando a empresa veio a conhecer essa nova solução que está chegando ao Brasil e resolveu utilizá-la como teste na construção de uma das áreas na sua nova sede, esta obra será descrita no capítulo 4 deste trabalho. Outros projetos também estão sendo estudados para o emprego da laje *bubbledeck*.

### 3. Revisão Bibliográfica

#### 3.1 Conceitos

O primeiro conceito a ser abordado será o de lajes cogumelo, já que foi utilizando este tipo de laje que as lajes *Bubbledeck* foram desenvolvidas. As lajes lisas (*flat slabs*) são lajes armadas em duas direções que se apóiam diretamente sobre pilares, podendo ou não existir um aumento de espessura nas regiões em torno dos pilares, formando os capitéis que dão a forma de “cogumelo” a estas estruturas. Tais lajes devem ter espessura mínima de 15cm e devem ser dimensionadas para momentos no vão e nos apoios (positivos e negativos) em duas direções e também à punção. (Leonhardt, F., 1979).

Nas lajes nervuradas temos a redução do concreto que não exerce função estrutural. São lajes em que a zona de tração é constituída por nervuras, onde são concentradas as armaduras de tração. Estas lajes possuem uma mesa de concreto na região comprimida, sendo o espaçamento entre nervuras regulamentado pela NBR6118. São normalmente empregadas quando os vãos a vencer são grandes, em prédios residenciais e comerciais, ou em alguns casos de carregamentos especiais. (De Souza, V. C. M.,1994)

*Bubbledeck* também é um método caracterizado pela eliminação do volume de concreto de uma laje, retirando o concreto que não exerce qualquer função estrutural, reduzindo com isso significativamente seu peso próprio, proporcionando mais leveza na estrutura sem perda de função estrutural. *Bubbledeck* é baseado numa nova técnica patenteada pelo engenheiro dinamarquês Jorgen Beuning. A formação de cavidades esféricas no meio das lajes elimina 35% do peso próprio das mesmas, removendo com isso as restrições de cargas permanentes elevadas e a necessidade de se construir vãos pequenos.

A incorporação das esferas de plástico reciclado como formadoras de vazios permitem colunas com intereixos 50% maiores. A combinação dessas esferas com o conceito de lajes cogumelo permite o aumento dos vãos nas duas direções – a laje é conectada diretamente às colunas através de concreto *in-situ* sem nenhuma viga. – produzindo muitos benefícios, tais como (*Bubbledeck internacional, 2005.*):

- Liberdade nos projetos – layouts flexíveis que facilmente se adaptam a layouts curvos e irregulares.
- Redução do peso próprio – 35% menor, permitindo redução nas fundações.
- Aumento dos intereixos das colunas – até 50% a mais do que estruturas tradicionais.
- Eliminação de vigas – execução mais barata e rápida de alvenarias e instalações.

- Eliminação de paredes de apoio – facilitando a metodologia construtiva.
- Redução do volume de concreto – 1kg do plástico reciclável das esferas substitui 100kg de concreto.
- Ambientalmente adequado – redução de energia e emissão de carbono, em função da utilização de plástico reciclável com diminuição do consumo de matérias primas.

O detalhamento para a obtenção dos módulos pré-fabricados *BubbleDeck* é apresentado a seguir. (*Bubbledeck internacional, 2005*)

As esferas plásticas ocas são primeiro combinadas com malhas de aço superiores e inferiores de armadura nas fábricas para formar as pré-lajes inferiores *BubbleDecks*. Essas pré-lajes podem já incluir reforços necessários para os momentos fletores. Se os módulos não são empregados com a pré-laje são denominados de módulos básicos *BubbleDeck* ou "*Bubble Lattice*".

Na figura 3.1 está apresentada uma seção típica de uma laje *BubbleDeck* com pré-laje.

Os módulos pré-fabricados *BubbleDeck* são produzidos despejando-se uma camada de concreto no módulo básico (*Bubble Lattice*). A flexibilidade resultante desse método garante aos módulos uma adaptação fácil para qualquer tipo de piso e podem acomodar tubos e partes de instalações. Além disso, podem ser incluídas aberturas, mesmo após a conclusão da laje.

A área total de cada piso é dividida em uma série de elementos individuais planejados, a cada 3 ou 2,4 metros de largura, dependendo do transporte ou acesso à obra. 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. Esta técnica permite a continuidade estrutural dos diversos elementos suprimindo os pontos de junta entre os mesmos.

As lajes *Bubbledeck* podem ser concretadas utilizando-se formas convencionais ou então podem ser feitos os módulos pré-fabricados já mencionados anteriormente ou até mesmo com a seção plena da laje. A combinação com outras técnicas de construção também é possível, por exemplo, o concreto protendido também pode ser utilizado. Todo o detalhamento das ligações e especificações podem ser projetados e executados da mesma maneira que o executado para lajes maciças. No anexo encontram-se detalhamentos de seções típicas de lajes *bubbledeck*.

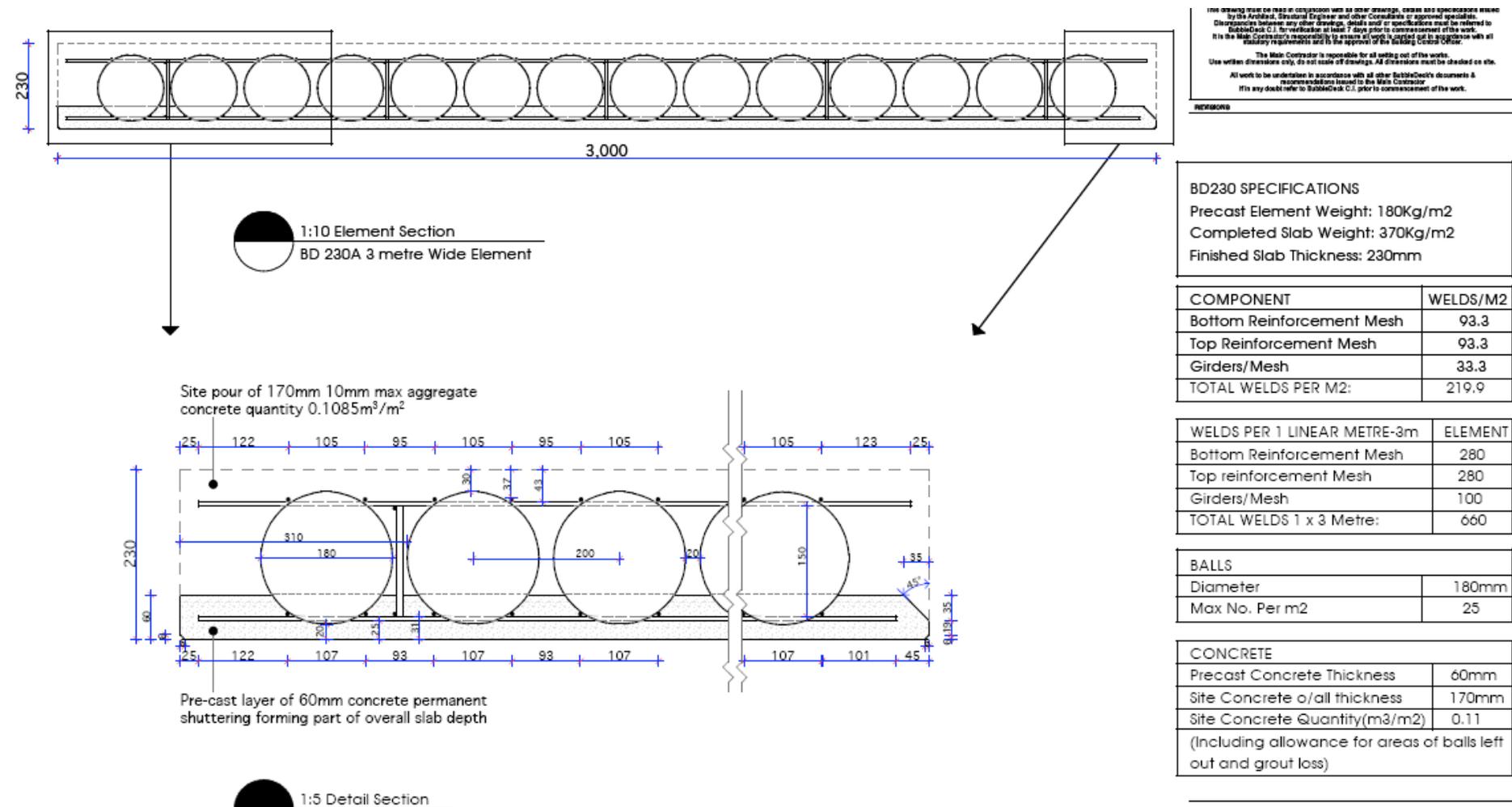


Figura 3.1 – Módulo básico *bubbledeck* – laje de 23cm

### 3.2 Características para o dimensionamento da laje *bubbledeck*

Na tabela 3.1 são apresentados os diâmetros padronizados das esferas e alguns valores relacionados a cada diâmetro. Os intereixos das esferas podem variar, assim como a capacidade de redução de carga e ambos esses fatores dependem do número de esferas projetados por metro quadrado.

Tabela 3.1 – Especificações Técnicas

Diâmetro da Esfera [cm]	18,00	22,50	27,00	31,50	36,00	40,50	45,00
Mínimo Intereixo das Esferas [cm]	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00
Máximo Número de Esferas [1/m <sup>2</sup> ]	25,00	16,00	11,11	8,16	6,25	4,94	4,00
Espessura Mínima da Laje [cm]	23,00	28,00	34,00	40,00	45,00	52,00	58,00
Redução de Carga Por Esfera [kN]	0,08	0,15	0,26	0,41	0,61	0,87	1,19
Redução Máx. de Carga /m <sup>2</sup> [kN/m <sup>2</sup> ]	1,91	2,39	2,86	3,34	3,82	4,29	4,77
Fator para Rigidez [-]	0,88	0,87	0,87	0,88	0,87	0,88	0,88
Fator para o Cortante [-]	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60

Fonte *Bubbledeck internacional, 2005.*

Como um guia geral para conceituação de projetos, os vãos máximos nos diferentes tipos de lajes *Bubbledeck* são geralmente determinados pelas limitações de flechas. Esse critério é determinado pela razão entre o menor comprimento (L) do vão e a espessura (h) da laje (L/d), estipulado pela norma britânica BS8110 ou pela norma europeia EC2 e modificado com a multiplicação por um fator de 1,5 para levar em conta a redução do peso próprio das lajes *Bubbledeck* em relação às lajes maciças. A razão L/d para os diferentes tipos de vãos está descrita a seguir:

$$L/h \leq 30 - \text{vãos simples}$$

$$L/h \leq 39 - \text{vãos contínuos}$$

$$L/h \leq 10,5 - \text{balanço}$$

Na tabela 3.2 encontramos os valores usuais de vãos para cada espessura padronizada das lajes *Bubbledeck* e sua carga permanente equivalente.

Tabela 3.2 – Vãos usuais e sua carga permanente equivalente.

Tipo	Espessura da Laje [mm]	Diâmetro das Esferas [mm]	Vão [m]	Carga(PP) [Kg/m <sup>2</sup> ]	Concreto [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]
<b>BD230</b>	230	φ 180	7 a 10	370	0,10
<b>BD280</b>	280	φ 225	8 a 12	460	0,14
<b>BD340</b>	340	φ 270	9 a 14	550	0,18
<b>BD390</b>	390	φ 315	10 a 16	640	0,20
<b>BD450</b>	450	φ 360	11 a 18	730	0,25

### 3.3 Testes de avaliação

Testes com lajes *Bubbledeck* foram realizados na Dinamarca, Holanda e Alemanha concluindo-se que:

- As lajes *Bubbledeck* têm uma melhor distribuição de tensões do que outras lajes com vazios. Devido a sua estrutura tri-dimensional e a gradual distribuição das forças, os vazios devido às esferas não têm influências negativas nem causarão perdas de capacidade de carga.

- Os testes também revelaram que a resistência ao corte é melhor de que se esperava, indicando uma influência positiva das esferas. Experiências mostraram um efeito positivo das esferas no processo de concretagem gerando um efeito similar à adição de aditivos plastificantes.

Utilizando as formulações usuais de Normas para encontrar a máxima capacidade cortante da laje *bubbledeck*, sem reforço para cortante, deve-se considerar a menor largura de concreto na seção ( $b_w$ ), sendo no caso da laje *bubbledeck* a distância entre duas esferas, que é bastante reduzida. Na figura 3.2 observa-se a largura reduzida,  $b_w$ , a ser considerada.

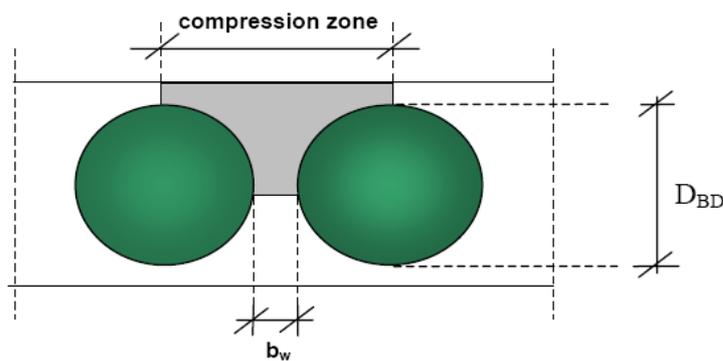


Figura 3.2 – Seção de uma laje *bubbledeck*

Através dessas formulações, na pior situação, a capacidade de resistência ao cortante da laje *bubbledeck* fica reduzida a 10% da capacidade de uma laje maciça, porém esses resultados não são encontrados empiricamente para estas lajes, já que a largura  $b_w$  somente existe em um ponto e aumenta ao longo da altura e comprimento da laje. Por isso os fatores redutores utilizados para a capacidade cortante para as lajes *bubbledeck* foram obtidos experimentalmente. (Aldejohann, M., 2002)

Nas Tabelas 3.3 à 3.5 e na figura 3.2 encontram-se uma comparação dos resultados obtidos nos testes supracitados.

Tabela 3.3 – Resultados Comparativos

<i>Em % laje maciça</i>	<b>BubbleDeck vs. laje maciça</b>		
	Mesma capacidade de carga	Mesma rigidez	Mesmo volume de concreto
Capacidade de carga	100	105	150
Rigidez	87	100	300
Volume de concreto	66	69	100

Fonte: *Technical University of Darmstadt / Germany*

A tabela 3.3 apresenta comparações de uma laje maciça com a laje *bubbledeck* ao fixar um elemento de comparação e assim mostrando a diferença para as outras comparações escolhidas. Como por exemplo ao fixar a mesma capacidade de carga para as duas lajes, a laje *bubbledeck* apresenta um rigidez de 87% e um volume de concreto de 66% em relação a laje maciça.

Tabela 3.4 – Resultados Comparativos – Cortante

<b>Capacidade de Corte (em % de laje maciça)</b>	<i>a/d = 2.15</i>	<i>a/d = 3.0</i>
Laje Maciça	100	100
BubbleDeck, treliças soldadas	91	78(81) <sup>1</sup>
BubbleDeck, treliças amarradas	77	

<sup>1</sup> Correção para elementos de testes com maior tempo de endurecimento.

a – distância da carga até o apoio

d - espessura

Fonte: *Eindhoven University of Technology*

Tabela 3.5 – Resultados Comparativos – Cortante

<b>Capacidade de Corte (em % de laje maciça)</b>	<i>a/d = 2.3</i>
Laje maciça	100
BubbleDeck, sem treliças	76

a – distância da carga até o apoio

d - espessura

Fonte: *The Engineering School in Horsens / Denmark*

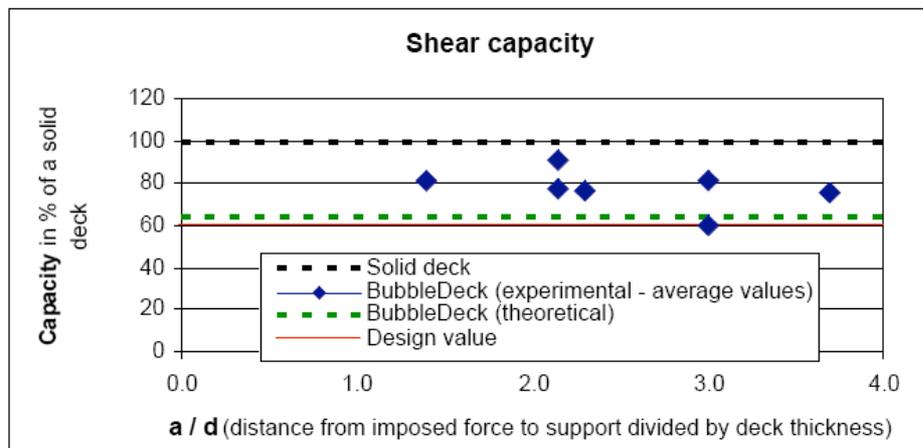


Figura 3.2 – Gráfico dos Resultados Comparativos – Cortante

Fonte: *The Technical University of Denmark*

Depreende-se da figura 3.2 que é recomendado adotar 60% do valor da capacidade de uma laje maciça ao esforço cortante.

Nas figuras 3.3 e 3.4 observamos a ruptura de uma laje maciça e da laje *bubbledeck* de mesma espessura, resultados de testes de avaliação, onde foram utilizadas as mesmas taxas de armadura, a mesma espessura de laje e mesmo  $f_{ck}$  para o concreto.

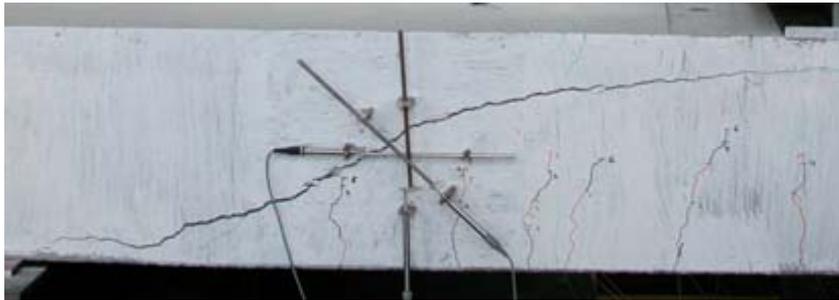


Figura 3.3 – Ruptura por cortante para laje maciça

Fonte: *Investigations on the shear capacity of biaxial hollow slabs*

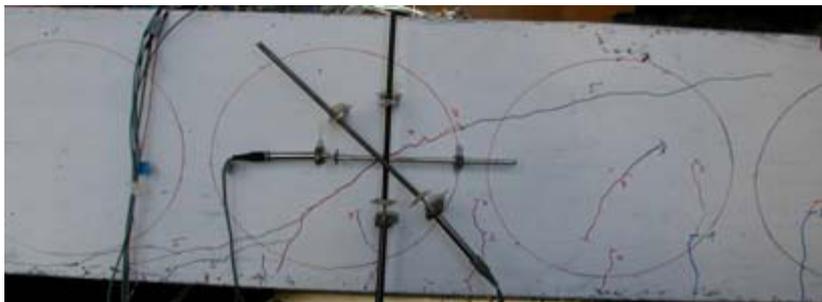


Figura 3.4 – Ruptura por cortante para laje *bubbledeck*

Fonte: *Investigations on the shear capacity of biaxial hollow slabs*

A figura 3.4 apresenta a indicação da localização das esferas no interior da laje. Nas figuras 3.3 e 3.4, observa-se a semelhança da superfície de ruptura para as duas lajes.

## **4. Descrição do primeiro pavimento *bubbledeck* no Brasil**

Neste capítulo será apresentada a solução feita em laje *bubbledeck* para a construção da nova sede da Odebrecht em Salvador, BA. Esta é a primeira obra a ser construída com o conceito de laje *bubbledeck* no Brasil, a solução original de laje maciça, vigas e capitéis foi substituída pela solução de lajes *bubbledeck* com a retirada das vigas e a introdução dos capitéis “embutidos”.

O projeto de fundações e dos pilares não foi refeito para melhor se adaptar ao novo tipo de solução. Assim neste projeto somente foi feita uma substituição do projeto do pavimento.

Cabe ressaltar que a autora deste trabalho, participou da elaboração do projeto executivo e teve a oportunidade de acompanhar a construção do setor A, que será descrito a seguir.

### **4.1 Projeto original**

Este projeto foi desenvolvido para a construção dos setores A, com área total de 278,4m<sup>2</sup> e B, com área total de 877m<sup>2</sup>, estes dois setores servirão de estacionamento deste novo complexo. O projeto original previa uma laje maciça com espessura de 19cm, vigas internas de 30cm/53cm e os capitéis. A espessura média, valor do volume total de concreto dividido pela área, no projeto original foi de 20,5cm para o setor A e de 20,4cm para o setor B. Em anexo encontram-se as plantas do projeto original.

### **4.2 Projeto utilizando a tecnologia *bubbledeck***

O projeto com solução em laje *bubbledeck* eliminou as vigas internas e o engrossamento dos capitéis, prevendo capitéis de laje maciça embutidos nas regiões próximas aos pilares. O projeto *bubbledeck* teve espessura final de laje de 23cm utilizando esferas de 18cm. O detalhamento da armadura foi executado com a consultoria realizada pelo representante da *Bubbledeck* Internacional, atendendo também a NBR6118.

#### **4.2.1 Descrição do projeto**

Os carregamentos considerados para o dimensionamento do projeto se encontram descritos a seguir, estes foram os mesmos carregamentos utilizados no projeto original:

Foi considerado um carregamento de 3,25kN/m<sup>2</sup> de revestimento e uma carga distribuída na viga da fachada de 1,125kN/m<sup>2</sup>, equivalente a mureta de 50cm existente no projeto de arquitetura. Como sobrecarga foi considerado um carregamento de 3,00kN/m<sup>2</sup>.

Para estas cargas, além do peso próprio, chegou-se a uma armadura para a malha, ou *lattice*, do projeto de  $\phi 8c.10$  para a armadura inferior e em regiões onde foi constatada a necessidade um reforço de  $\phi 6,3c.10$ , para a armadura superior da *lattice* foi adotado  $\phi 6,3c.10$ , com reforço nas ligações entre os painéis e uma armadura de  $\phi 12,5c.10$  e de  $\phi 10c.10$  para as regiões próximas aos pilares. Além das armaduras complementares de borda e de punção. A espessura média para o setor A foi de 16,7cm e para o setor B de 16,4cm, para o setor A foi obtido uma massa total de aço de 6072kg e um volume de concreto de 46,54m<sup>3</sup>, obtendo uma taxa de 130,5kg/m<sup>3</sup>, o número de esferas plásticas utilizadas neste setor foi de 5728. Para o setor B foi obtido uma massa total de aço de 19211kg e um volume de concreto de 144,05m<sup>3</sup>, obtendo uma taxa de 133,4kg/m<sup>3</sup>, o número de esferas utilizados neste setor foi de 18883. Em anexo encontram-se os projetos *bubbledeck* executados.

### **4.3 Etapa construtiva**

A construção foi dividida em duas etapas, primeiro foi armada e concretada a laje do setor A e durante a concretagem do setor A começou a armação do setor B. As armaduras foram construídas de acordo com o projeto com uma malha inferior e outra superior e uma treliça juntando as duas malhas em alguns trechos pra melhor fixação das esferas. O espaçamento adotado se adapta ao espaçamento entre as esferas e para melhor encaixe destas na malha.

Nas figuras 4.1 à 4.11 encontram-se fotos retiradas pela autora, das etapas de construção do Setor A. Nas figuras encontram-se detalhes da montagem das malhas de ferro, montagem das esferas e da concretagem.



Figura 4.1 – Montagem das malhas de aço



Figura 4.2 – Montagem das esferas



Figura 4.3 – Montagem das esferas



Figura 4.4 – Detalhe da armadura do capitel



Figura 4.5 – Detalhe da junta de ligação entre os dois setores



Figura 4.6 – Concretagem e armadura do capitel



Figura 4.7 – Concretagem



Figura 4.8 – Primeira etapa de concretagem



Figura 4.9 – Segunda etapa de concretagem



Figura 4.10 – Detalhe de erro de concretagem



Figura 4.11 – Detalhe de erro de concretagem

Observa-se nas figuras 7.10 e 7.11, um erro na primeira etapa de concretagem, pois foi concretada uma camada inferior de espessura muito superior aos 6 centímetros necessários nesta etapa, ocasionando desse modo a elevação local das esferas.

## 5. Dimensionamento – laje *bubbledeck*

### 5.1 Modelo Matemático

Utilizou-se o programa SAP2000 V10.0.7 para obtenção dos esforços na laje. O modelo foi feito simulando-se um trecho de um andar para obtenção dos valores comuns para esforços em edificações. Este tipo de laje usa o conceito de lajes cogumelo onde os elementos de viga são eliminados. Foram utilizados 4 painéis de 8,1m x 8,1m conforme exemplo encontrado no material disponível sobre as lajes nervuradas “ATEX” (site Atex, acessado em 07/2009), as sobrecargas utilizadas também estão de acordo com as utilizadas no exemplo de lajes “ATEX”. O carregamento foi suposto uniforme para toda a laje, sem distribuição dos carregamentos em diferentes painéis, utilizada para realização da envoltória dos esforços e da deformação. Os pilares, simulados através de molas, foram supostos com seção de 30cm x 30cm e 3,5m de altura.

Para este vão foi escolhida a laje *bubbledeck* com espessura de 23cm, tanto os trechos de laje maciça quanto de laje com *bubbledeck*, foram simulados por elementos de áreas de espessura de 23cm. Para os elementos da laje de *bubbledeck* foram utilizados fatores de redução para as rizezas e para o peso. No modelo matemático foram utilizados 4 painéis para se obter e dimensionar para os esforços de um trecho típico de uma edificação. Assim foram feitas as verificações e os dimensionamentos para o trecho ao redor do pilar central. Os painéis foram divididos em elementos de placa com 0,5x0,5m de área. Nas regiões próximas aos pilares foram utilizados elementos de mesma espessura da laje *bubbledeck*, porém maciços, sem os fatores de redução, foi suposta uma área de 2x2m para a região maciça em torno os pilares.

Molas simulando a rigidez axial dos pilares:

$$K = EA/L$$

$$K := \frac{21\text{GPa} \cdot 0.3\text{m} \cdot 0.3\text{m}}{3.75\text{m}} = 5.04 \times 10^5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (\text{eq.1})$$

Fatores de redução empregados para a laje *bubbledeck* estão apresentados no quadro 1 e na figura 5.1 está representado o modelo matemático empregado.

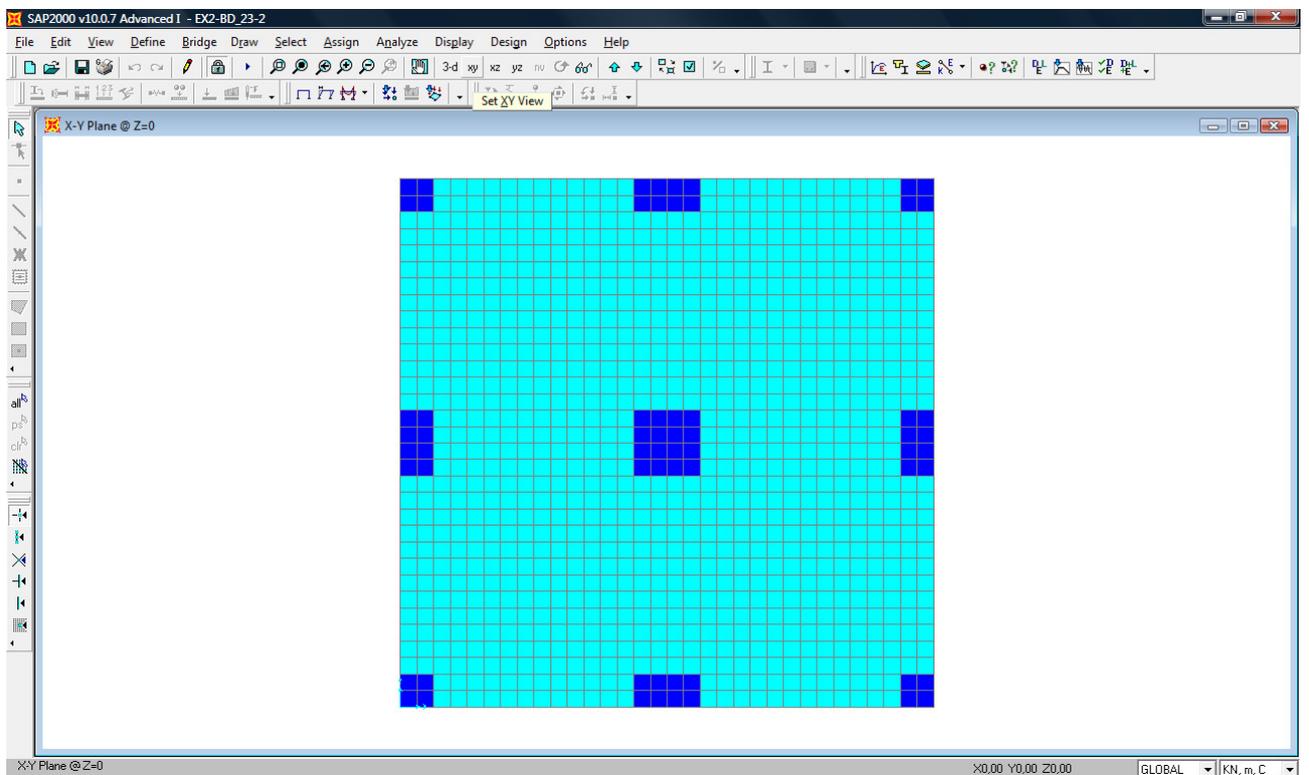
Quadro 1- Fatores de redução empregados para a laje com *bubbledeck*

**Property/Stiffness Modification Factors**

Property/Stiffness Modifiers for Analysis

Membrane f11 Modifier	0.68
Membrane f22 Modifier	0.68
Membrane f12 Modifier	0.68
Bending m11 Modifier	0.9
Bending m22 Modifier	0.9
Bending m12 Modifier	0.9
Shear v13 Modifier	0.6
Shear v23 Modifier	0.6
Mass Modifier	0.68
Weight Modifier	0.68

OK Cancel

Figura 5.1 - Modelo Laje *bubbledeck*

## 5.2 Carregamentos e Combinações

### 5.2.1 Peso Próprio

Automaticamente considerado pelo programa – “DEAD”.

### 5.2.2 Sobrecarga – “SC”

Foi considerado um carregamento de 2kN/m<sup>2</sup>.

### 5.2.3 Revestimento – “REV”

Foi considerado um carregamento de 1kN/m<sup>2</sup>.

### 5.2.4 Divisórias – “DIV”

Foi considerado um carregamento de 0,9kN/m<sup>2</sup>.

### 5.2.5 Combinação de Carregamentos

No quadro 2 e 3 encontram-se as combinações utilizadas.

Quadro 2 – COMB1 – Soma de todos os carregamentos anteriores.

Response Combination Data

Response Combination Name: COMB1

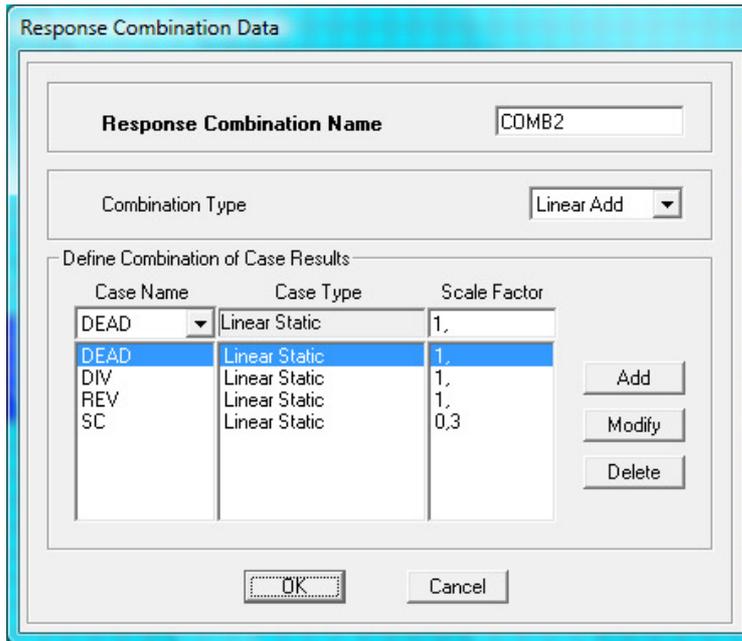
Combination Type: Linear Add

Define Combination of Case Results

Case Name	Case Type	Scale Factor
DEAD	Linear Static	1.
DEAD	Linear Static	1.
DIV	Linear Static	1.
REV	Linear Static	1.
SC	Linear Static	1.

Buttons: Add, Modify, Delete, OK, Cancel

Quadro 3 – COMB2 – Combinação de serviço para deformação excessiva.



### 5.3 Esforços encontrados

Nas figuras 5.2 e 5.3 encontram-se os resultados dos momentos para nas duas direções da laje. O diagrama de distribuição dos momentos em um eixo perpendicular à meio vão e no apoio se encontram em anexo.

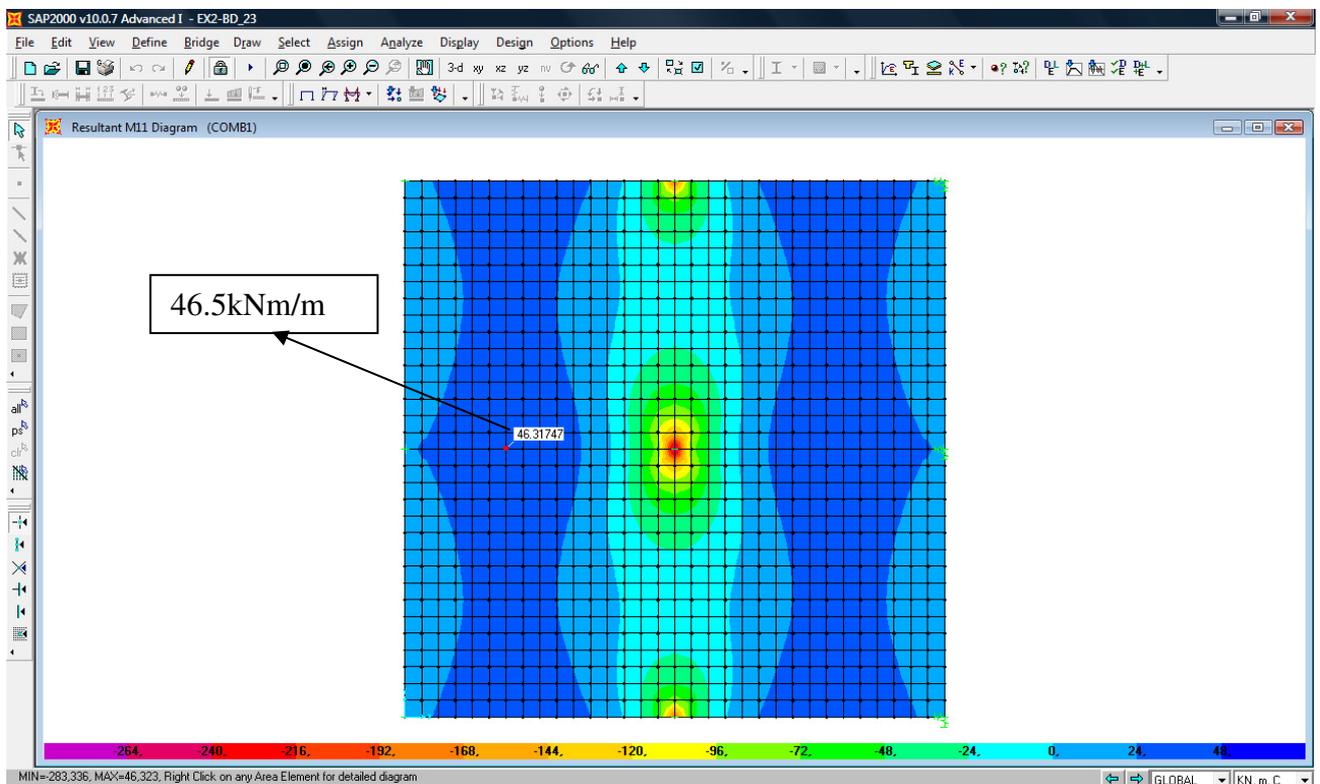


Figura 5.2 – Diagrama de momentos (M11)

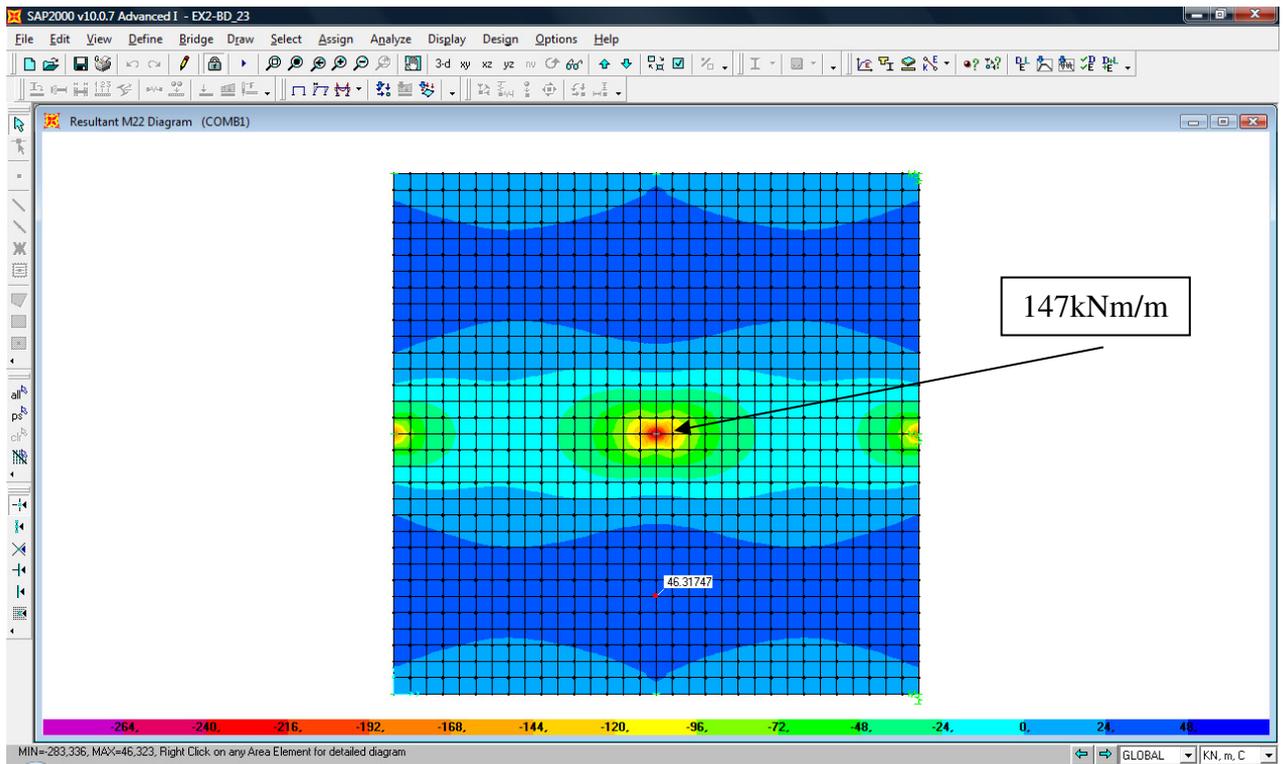


Figura 5.3 – Diagrama de momentos (M22)

#### 5.4 Flecha encontrada

Na figura 5.4 encontra-se a maior flecha encontrada para a combinação 2.

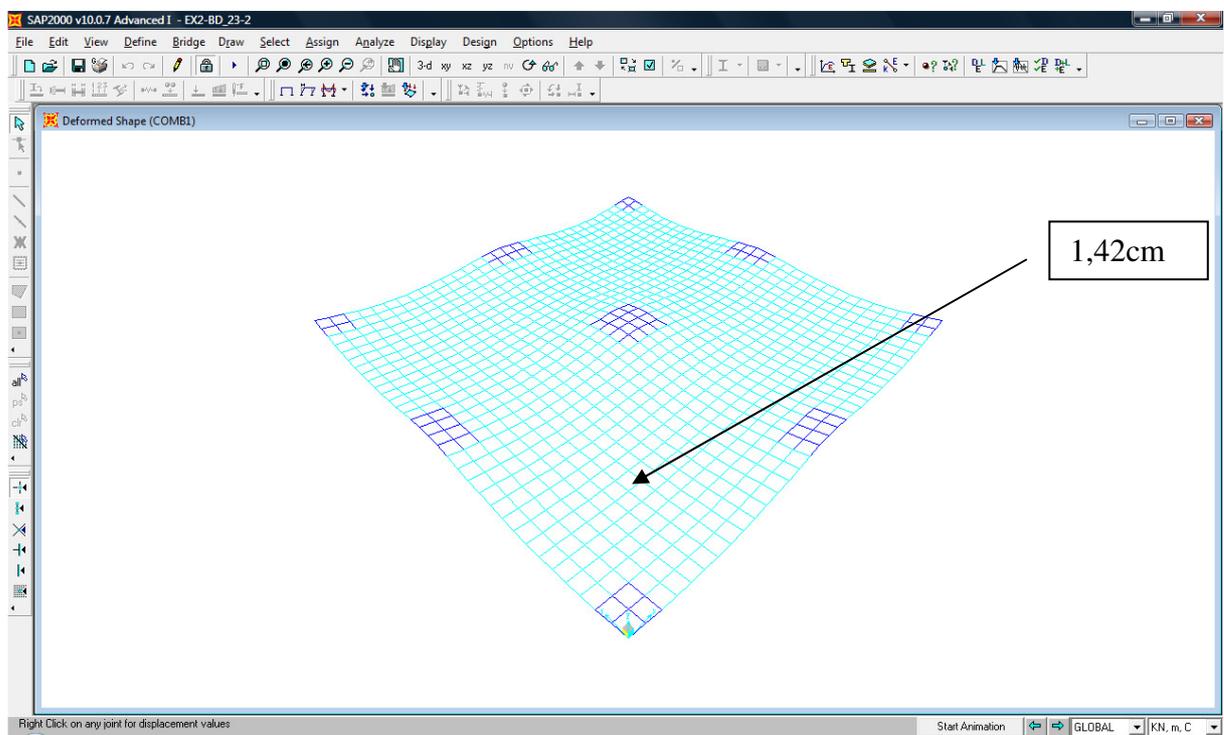


Figura 5.4 – flecha encontrada

## 5.5 Dimensionamento da laje *bubbledeck*

As plantas de armadura, de determinação dos perímetros C', C'' e do trecho de painel típico dimensionado se encontram em anexo.

### 5.5.1 Armadura inferior do painel – trecho mais solicitado

Foi utilizada a mesma armadura nos dois sentidos.  $f_{ck} = 30\text{MPa}$ ; Aço CA-50 – Utilizando o diagrama simplificado retangular para distribuição de tensões.

Ver em anexo a planta de armadura para laje *bubbledeck*, armadura para faixa central.

O dimensionamento foi feito de acordo com a NBR6118, com o auxílio do programa MathCad v.14. (NBR6118, 2003)

$M_{\max} = 46,5 \text{ kNm/m}$

$$K_{md} = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad (\text{eq.2}) \quad A_s = \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} \quad (\text{eq.3})$$

$$e := 0.23\text{m} \quad c := 0.03\text{m}$$

$$d := e - c = 0.2\text{m}$$

$$f_{cd} := \frac{30}{1.4} \text{MPa} = 2.143 \times 10^4 \cdot \text{kPa} \quad (\text{eq. 4})$$

$$f_{yd} := \frac{500}{1.15} \text{MPa} = 4.348 \times 10^5 \cdot \text{kPa} \quad (\text{eq. 5})$$

$$M_{\max} := 46.5 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$M_d := 1.4 \cdot M_{\max} = 65.1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$K_{md} := \frac{M_d}{1\text{m} \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = 0.076 \quad K_{md_{bd}} := \frac{K_{md}}{0.9} = 0.084 \quad (\text{eq. 6 e 7})$$

$$K_x := \frac{\left[ 1 - \left[ 1 - \left( 2 \cdot \frac{K_{md_{bd}}}{0.85} \right) \right]^{0.5} \right]}{0.8} \quad K_z := 1 - 0.4K_x \quad (\text{eq. 8 e 9})$$

$$K_z = 0.948$$

$$A_s := \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} = 7.9 \cdot \text{cm}^2 / \text{m} \quad (\text{eq. 10})$$

$$A_{\text{adotado}} = \phi 10\text{c}.10 = 8\text{cm}^2 / \text{m}$$

(Ver seções típicas em anexo)

### 5.5.2 Armadura superior do painel

Foi utilizada para a armadura superior das malhas a armadura mínima recomendada pelo detalhamento da *bubbledeck*, já que só há o aparecimento de momentos negativos nas regiões próximas e entre os pilares.

$$A_{\text{adotado}} = \phi 6,3c.10 = 3,15\text{cm}^2 / m$$

### 5.5.3 Armadura superior na região sobre os pilares - trecho mais solicitado

Para a região dos pilares tenho uma armadura superior maior devido a concentração de esforços nessa região, essa armadura foi utilizada para a faixa da região dos pilares com uma largura 1m para ambos os lados do pilar, essa distribuição foi escolhida com base no diagrama de distribuição dos momentos, em anexo, onde observa-se um redução bastante acentuada dos esforços. Ver em anexo planta de armadura para laje *bubbledeck*.

$$M_{\text{max}} = 147 \text{ kNm/m}$$

$$K_{md} = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad A_s = \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

$$M_d := 1.4 \cdot M_{\text{max}} = 205.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} / m$$

$$K_{md} := \frac{M_d}{1\text{m} \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = 0.24$$

$$K_x := \frac{\left[ 1 - \left[ 1 - \left( 2 \cdot \frac{K_{md}}{0.85} \right) \right]^{0.5} \right]}{0.8} \quad K_z := 1 - 0.4K_x$$

$$K_z = 0.83$$

$$A_s := \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} = 28.522 \cdot \text{cm}^2 / m$$

$$A_{\text{adotado}} = \phi 20c.10 = 31,5\text{cm}^2 / m$$

### 5.5.4 Determinação da região de laje maciça para o pilar central

Estas regiões são dimensionadas pela limitação das tensões de corte, utilizando um fator redutor de 0,6 devido às esferas conforme recomendado pelo emprego da tecnologia *bubbledeck*.

- Verificação da região para não se armar o cortante

$$\underline{N} := 0 \quad A_c := 1 \cdot e = 0.23 \text{ m}$$

$$\sigma_{cp} := \frac{N}{A_c} = 0 \quad \underline{d} := 0.2 \quad (\text{eq. 11})$$

$$k := 1.6 - d = 1.4 \quad \rho_1 := \frac{31.5}{23 \cdot 100} = 0.014 \quad (\text{eq. 12 e 13})$$

$$f_{ctm} := 0.3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 2.896 \text{ MPa} \quad (\text{eq. 14})$$

$$f_{ctk_{inf}} := 0.7 f_{ctm} = 2.028 \text{ MPa} \quad (\text{eq. 15})$$

$$f_{ctd} := \frac{f_{ctk_{inf}}}{1.4} = 1.448 \text{ MPa} \quad (\text{eq. 16})$$

$$\tau_{Rd} := 0.25 \cdot f_{ctd} = 0.362 \text{ MPa} \quad (\text{eq. 17})$$

$$\tau_{rd1} := \tau_{Rd} \cdot k \cdot (1.2 + 40 \cdot \rho_1) + 0.15 \cdot \sigma_{cp} = 0.886 \text{ MPa} \quad (\text{eq. 18})$$

$$\underline{F}_{\max} := 765 \text{ kN} \quad \text{Reação no pilar central}$$

$$\underline{F}_{sd} := 1.4 \cdot F_{\max} = 1.071 \times 10^3 \cdot \text{kN} \quad (\text{eq. 19})$$

$$\underline{q} := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 0.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + (0.23 \cdot 25) \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 9.65 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (\text{eq. 20})$$

$$\frac{F_{sd} - qx^2}{4x \cdot d} := 0.6 \cdot \tau_{rd1} \quad (\text{eq. 21})$$

$$x := 2.388 \text{ m}$$

Fica definido uma região de laje maciça de 2,4x2,4m, tendo-se então um perímetro de 9,6m e uma área de 5,76m<sup>2</sup>.

- Punção

Verificação da compressão diagonal do concreto (contorno C)

$$u_0 := 2 \cdot b + 2 \cdot h = 1.2 \text{ m} \quad (\text{eq. 21})$$

$$\tau_{sd} := \frac{F_{sd} - q \cdot (0.3\text{m})^2}{u_0 \cdot d} = 4.459 \cdot \text{MPa} \quad (\text{eq. 22})$$

$$\alpha_v := 1 - \frac{30}{250} = 0.88 \quad (\text{eq. 23})$$

$$\tau_{rd2} := 0.27 \cdot \alpha_v \cdot \frac{30}{1.4} \text{MPa} = 5.091 \cdot \text{MPa} \quad \text{OK} \quad (\text{eq. 24})$$

Dimensionamento da armadura

$$u := 2 \cdot (b + 4d) + 2 \cdot (h + 4d) = 4.4 \text{ m}$$

$$F_{\text{max}} := 765 \text{ kN} \quad \text{Reação no pilar central}$$

$$F_{sdv} := 1.4 \cdot F_{\text{max}} = 1.071 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$\tau_{sd} := \frac{F_{sd} - q \cdot (1.1\text{m})^2}{u \cdot d} = 1.204 \times 10^3 \cdot \text{kPa}$$

$$\tau_{rd3} := 0.1 \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 1.5 \cdot \frac{d \cdot A_{sw} \cdot f_{ywd}}{s_r \cdot u \cdot d} \quad (\text{eq. 25})$$

$$s_r := 0.75 \cdot d = 0.15 \text{ m}$$

$$f_{ywd} := 324.5 \text{ MPa} = 3.245 \times 10^5 \cdot \text{kPa} \quad (\text{interpoladolinearment}) \quad (\text{eq. 26})$$

$$A_{sw} := \frac{\left[ \tau_{sd} - 0.1 \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \text{MPa} \right] \cdot s_r \cdot u \cdot d}{1.5 \cdot d \cdot f_{ywd}} = 6.965 \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{eq. 27})$$

$$A_{swdot} = \phi 10 c. 10 = 8 \text{ cm}^2$$

- Armadura de Colapso Progressivo

Para garantir a ductilidade local e conseqüentemente proteção ao colapso progressivo.

$$A_s := \frac{F_{sd}}{f_{yd}} = 24.633 \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{eq.27})$$

Com 4 $\phi$ 20 cruzando cada face do pilar tenho  $A_s = 8 \times 3,14 = 25,1 \text{cm}^2 \geq 24,663 \text{cm}^2 \longrightarrow OK$

### 5.5.5 Armadura superior de ligação entre os painéis – trecho menos solicitado

Foi utilizada a mesma armadura nos dois sentidos. A armadura dimensionada a seguir é localizada entre os painéis, onde surgem os momentos negativos, com largura de 1/4 para cada lado. Ver em anexo planta de armadura para laje *bubbledeck*.

$M_{\max} = 45,9 \text{ kNm/m}$

$$K_{md} = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad A_s = \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

$$M_d := 1.4 \cdot M_{\max} = 64.26 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$K_{md} := \frac{M_d}{1 \text{m} \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = 0.075 \quad K_{md_{bd}} := \frac{K_{md}}{0.9} = 0.083$$

$$K_x := \frac{\left[ 1 - \left[ 1 - \left( 2 \cdot \frac{K_{md_{bd}}}{0.85} \right) \right]^{0.5} \right]}{0.8} \quad K_z := 1 - 0.4K_x$$

$$K_z = 0.948$$

$$A_s := \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} = 7.793 \cdot \text{cm}^2 / \text{m}$$

$$A_{\text{adotado}} = \phi 10 \text{c} \cdot 10 = 8 \text{cm}^2 / \text{m}$$

Para o trecho localizado entre esta faixa e a faixa de 1m para cada lado do pilar foi adotada uma armadura intermediária com base no diagrama de distribuição de momentos. Ver planta e armadura em anexo.

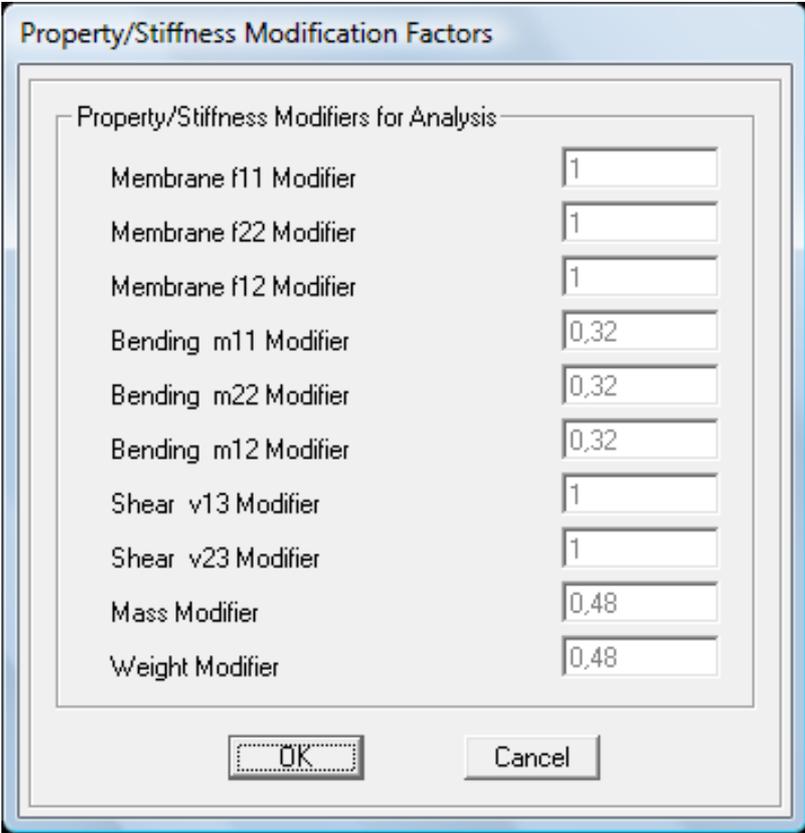
## 6. Dimensionamento - laje nervurada “ATEX”

### 6.1 Modelo Matemático

Para as lajes nervuradas modelo “ATEX 900x225” foi utilizado o mesmo modelo matemático da laje *bubbledeck*. Esta laje nervurada tem a altura final de 27,5 cm. Os fatores redutores de peso e rigidez da laje foram obtidos no catálogo ATEX. (site ATEX, acessado em 07/2009).

Fatores de redução empregados para a laje nervurada estão apresentados no quadro 3 e na figura 6.1 esta representado o modelo matemático empregado:

Quadro 3 – Fatores de redução para a laje nervurada



Property/Stiffness Modifiers for Analysis	Value
Membrane f11 Modifier	1
Membrane f22 Modifier	1
Membrane f12 Modifier	1
Bending m11 Modifier	0,32
Bending m22 Modifier	0,32
Bending m12 Modifier	0,32
Shear v13 Modifier	1
Shear v23 Modifier	1
Mass Modifier	0,48
Weight Modifier	0,48

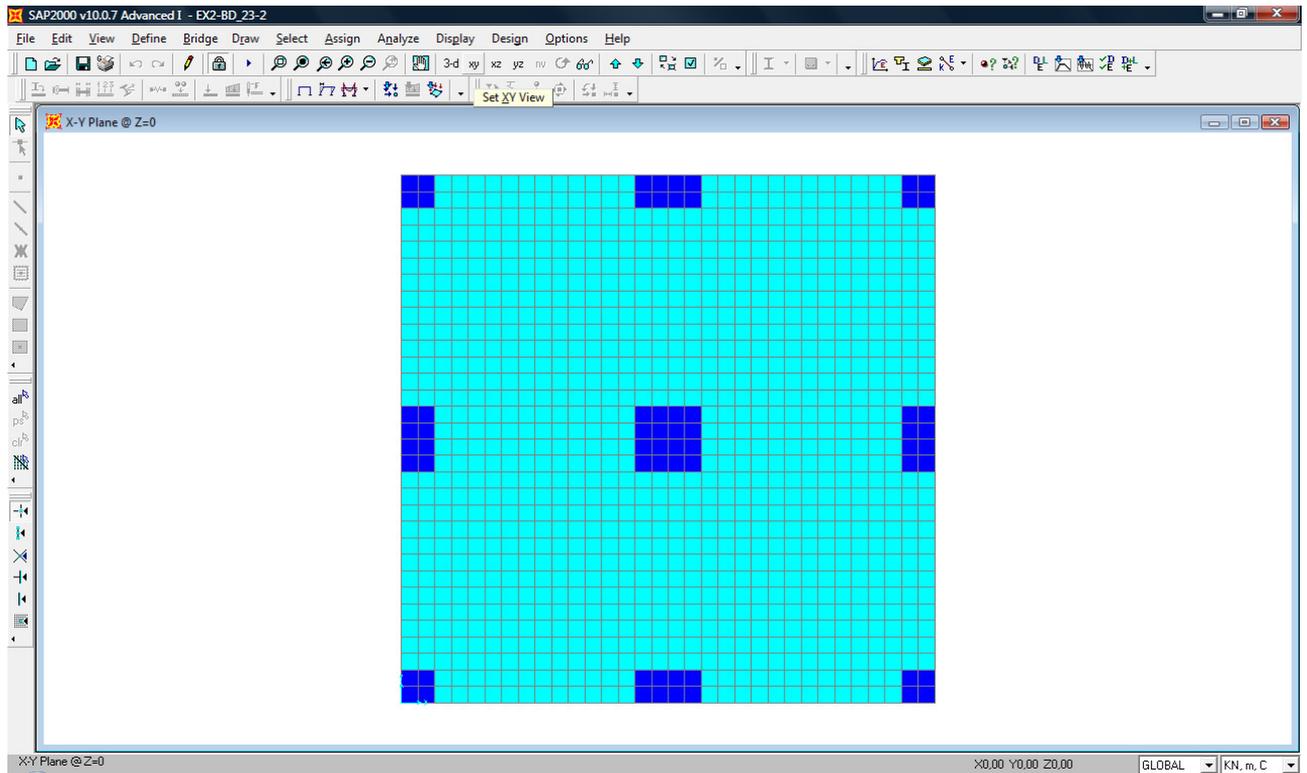


Figura 6.1 – Modelo laje nervurada

## 6.2 Carregamentos e Combinações

As mesmas considerações e demonstrações feitas para os carregamentos e combinações utilizados para a laje *bubbledeck*, itens 5.2.1 à 5.2.5, foram considerados para a laje nervurada.

### 6.3 Esforços encontrados

Nas figuras 6.2 e 6.3 encontram-se os resultados dos momentos para nas duas direções da laje. O diagrama de distribuição dos momentos em um eixo perpendicular à meio vão e no apoio se encontram em anexo.

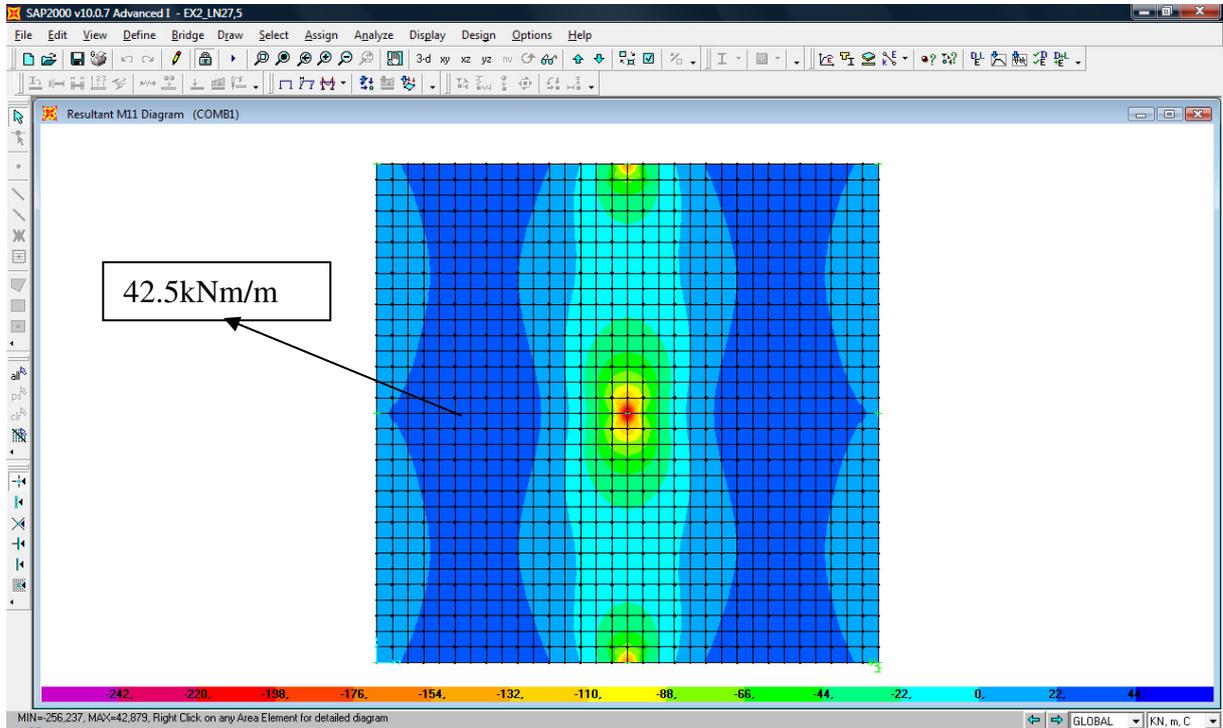


Figura 6.2 – Diagrama de momentos (M11)

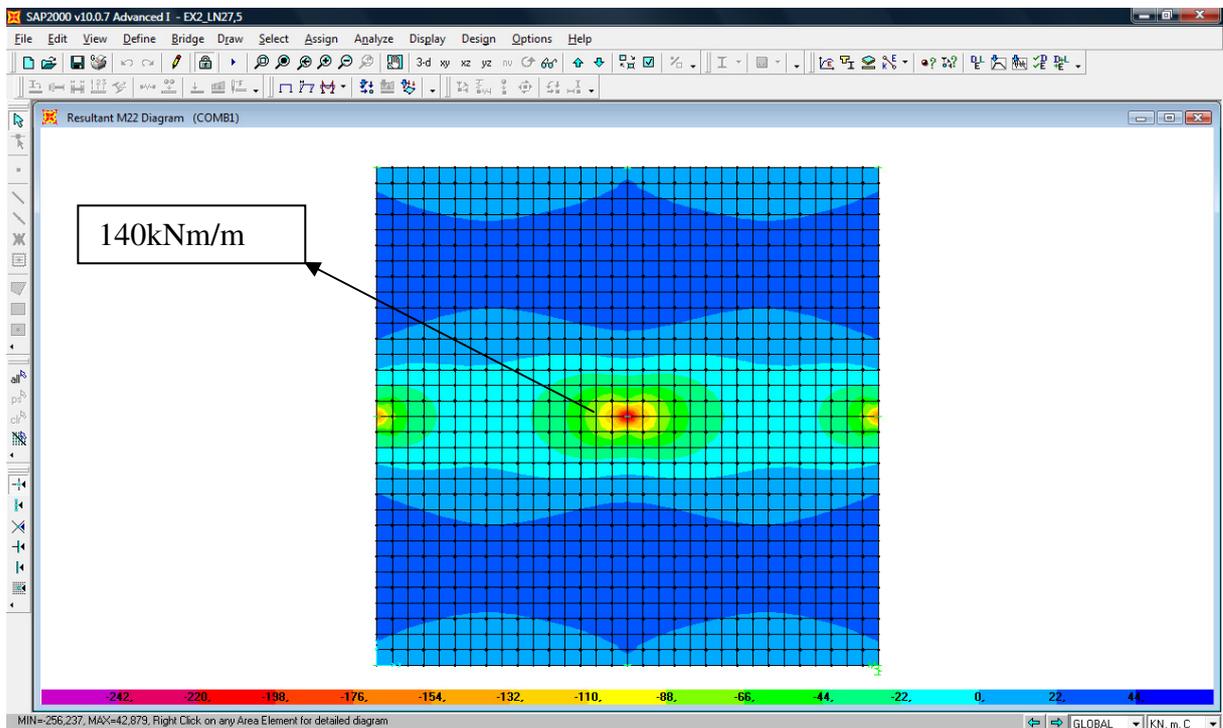


Figura 5.3 – Diagrama de momentos (M22)

## 6.4 Flecha encontrada

Na figura 6.4 encontra-se a maior flecha encontrada para a combinação 2.

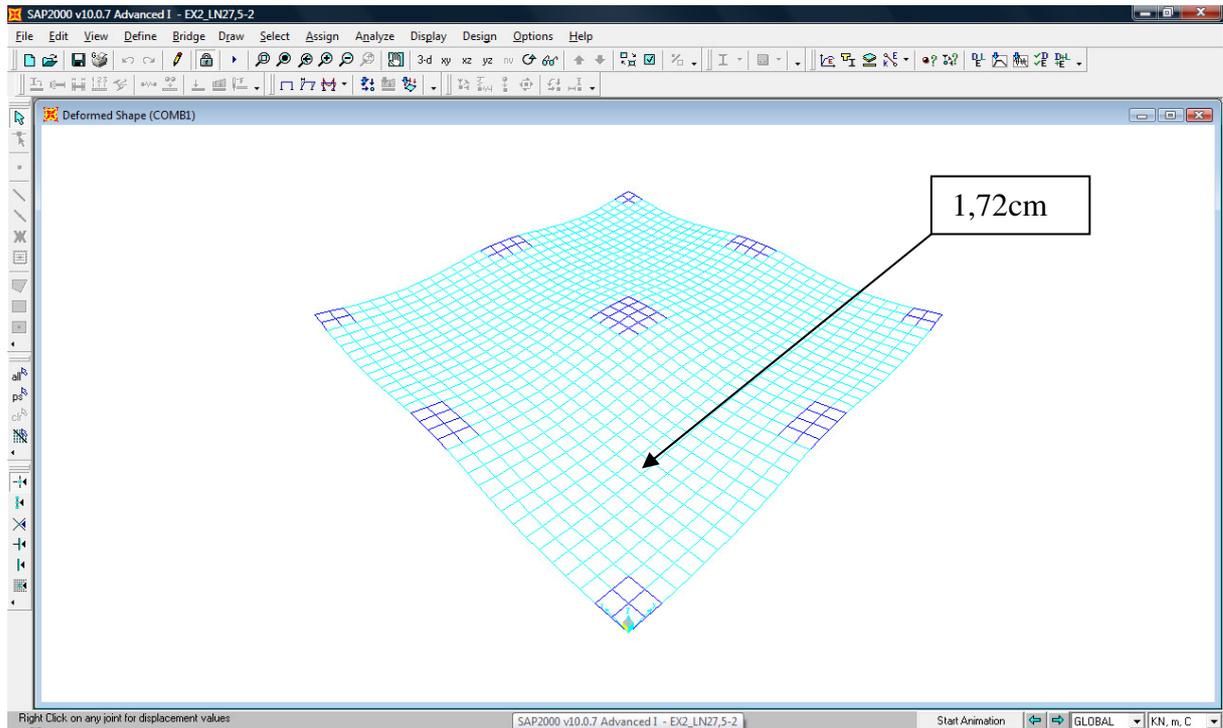


Figura 6.4 – flecha encontrada

## 6.5 Dimensionamento da laje nervurada

As plantas de armadura, de determinação dos perímetros  $C'$ ,  $C''$  e do trecho de painel típico dimensionado se encontram em anexo.

### 6.5.1 Armadura inferior

Foi utilizada a mesma armadura nos dois sentidos.  $f_{ck} = 30\text{MPa}$  ; Aço CA-50 – Utilizando o diagrama simplificado retangular para distribuição de tensões.

Ver em anexo a planta de armadura para laje nervurada, armadura para faixa central.

O dimensionamento foi feito de acordo com a NBR6118, com o auxílio do programa MathCad v.14. (NBR6118, 2003)

$$M_{\max} = 42,5 \text{ kNm/m}$$

$$K_{md} = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad A_s = \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

$$e := 0.275 \text{ m} \quad c := 0.03 \text{ m}$$

$$d := e - c = 0.245 \text{ m}$$

$$f_{cd} := \frac{30}{1.4} \text{ MPa} = 2.143 \times 10^4 \cdot \text{kPa}$$

$$f_{yd} := \frac{500}{1.15} \text{ MPa} = 4.348 \times 10^5 \cdot \text{kPa}$$

$$M_{\max} := 42.5 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$M_d := 1.4 \cdot M_{\max} = 59.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$K_{md} := \frac{M_d}{1 \text{ m} \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = 0.046$$

$$K_x := \frac{\left[ 1 - \left[ 1 - \left( 2 \cdot \frac{K_{md}}{0.85} \right) \right]^{0.5} \right]}{0.8} \quad K_z := 1 - 0.4K_x$$

$$K_z = 0.972$$

$$A_s := \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} = 5.747 \cdot \text{cm}^2 / \text{m}$$

$$A_{\text{adotado}} = 2\phi 10 + 3\phi 12,5 = 5,35 \text{ cm}^2 / 0,9 \text{ m}$$

## 6.5.2 Armadura superior na região sobre os pilares – trecho mais solicitado

Para a região dos pilares tenho uma armadura superior maior devido a concentração de esforços nessa região, essa armadura foi utilizada para a faixa da região dos pilares com uma largura 1m para ambos os lados do pilar, essa distribuição foi escolhida com base no diagrama de distribuição dos momentos, em anexo, onde observa-se um redução bastante acentuada dos esforços. Ver em anexo planta de armadura para laje nervurada.

$$M_{\max} = 140 \text{ kNm/m}$$

$$K_{md} = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad A_s = \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}}$$

$$\underline{M_d} := 1.4 \cdot M_{\max} = 196 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$\underline{K_{md}} := \frac{M_d}{1 \text{m} \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = 0.152$$

$$\underline{K_x} := \frac{\left[ 1 - \left[ 1 - \left( 2 \cdot \frac{K_{md}}{0.85} \right)^{0.5} \right] \right]}{0.8} \quad \underline{K_z} := 1 - 0.4K_x$$

$$K_z = 0.9$$

$$\underline{A_s} := \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} = 20.434 \cdot \text{cm}^2 / \text{m}$$

$$A_{\text{adotado}} = \phi 20 \text{c} \cdot 15 = 21 \text{cm}^2 / \text{m}$$

### 6.5.3 Determinação da região de laje maciça

Estas regiões são dimensionadas pela limitação das tensões de corte e de acordo com a punção, utilizando um fator redutor ( $\beta$ ) de 0,19, calculado a partir das características obtidas nos dados em anexo para a laje nervurada escolhida, dividindo-se a espessura média pela distância entre nervuras.

$$\beta = (17\text{cm})/90\text{cm} = 0,19 \quad (\text{eq. 25})$$

- Região determinada para o pilar central

- Verificação da região para não se armar o cortante

$$\underline{N} := 0 \quad A_c := 1 \cdot e = 0.275 \text{ m}$$

$$\sigma_{cp} := \frac{N}{A_c} = 0 \quad \underline{d} := 0.245$$

$$k := 1.6 - d = 1.355 \quad \rho_1 := \frac{21}{27.5 \cdot 100} = 7.636 \times 10^{-3}$$

$$f_{ctm} := 0.3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 2.896 \quad \text{MPa}$$

$$f_{ctk_{inf}} := 0.7 f_{ctm} = 2.028 \quad \text{MPa}$$

$$f_{ctd} := \frac{f_{ctk_{inf}}}{1.4} = 1.448 \quad \text{MPa}$$

$$\tau_{Rd} := 0.25 \cdot f_{ctd} = 0.362 \quad \text{MPa}$$

$$\tau_{rd1} := \left[ \tau_{Rd} \cdot k \cdot (1.2 + 40 \cdot \rho_1) + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right] = 0.739 \quad \text{MPa}$$

$$F_{\max} := 729 \text{ kN} \quad \text{Reação no pilar central}$$

$$F_{sd} := 1.4 \cdot F_{\max} = 1.021 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$q := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 0.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + (0.275 \cdot 25) \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 10.775 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\frac{F_{sd} - qx^2}{4x \cdot d} := 0.19 \cdot \tau_{rd1}$$

$$x := 5.26 \text{ m}$$

Fica definida uma região de laje maciça de 5,3x5,3m, tendo-se então um perímetro de 21,2m e uma área de 28,09m<sup>2</sup>

Como observa-se no resultado obtido para as dimensões da laje maciça, devido a grande redução de área na laje nervurada, obtêm-se um fator redutor de corte muito pequeno o que leva a uma determinação de região maciça muito elevada.

- Punção

Verificação da compressão diagonal do concreto (contorno C)

$$u_0 := 2 \cdot b + 2 \cdot h = 1.2 \text{ m}$$

$$\tau_{sd} := \frac{F_{sd} - q \cdot (0.3 \text{ m})^2}{u_0 \cdot d} = 3.468 \cdot \text{MPa}$$

$$\alpha_v := 1 - \frac{30}{250} = 0.88$$

$$\tau_{rd2} := 0.27 \cdot \alpha_v \cdot \frac{30}{1.4} \text{ MPa} = 5.091 \cdot \text{MPa} \quad \text{OK}$$

Dimensionamento da armadura

$$u_w := 2 \cdot (b + 4d) + 2 \cdot (h + 4d) = 5.12 \text{ m}$$

$$F_{\max} := 729 \text{ kN} \quad \text{Reação no pilar central}$$

$$F_{sd} := 1.4 \cdot F_{\max} = 1.021 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$\tau_{sd} := \frac{F_{sd} - q \cdot (1.28 \text{ m})^2}{u \cdot d} = 799.543 \cdot \text{kPa}$$

$$\tau_{d3} := 0.1 \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 1.5 \cdot \frac{d \cdot A_{sw} \cdot f_{ywd}}{s_r \cdot u \cdot d}$$

$$s_r := 0.75 \cdot d = 0.184 \text{ m}$$

$$f_{ywd} := 365.6 \text{ MPa} = 3.656 \times 10^5 \cdot \text{kPa} \quad (\text{interpolado linearmente})$$

$$A_{sw} := \frac{\left[ \tau_{sd} - 0.1 \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \text{ MPa} \right] \cdot s_r \cdot u \cdot d}{1.5 \cdot d \cdot f_{ywd}} = 4.442 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_{swadot} = \phi 8 c.10 = 5 \text{ cm}^2$$

- Armadura de Colapso Progressivo

Para garantir a ductilidade local e conseqüentemente proteção ao colapso progressivo.

$$A_s := \frac{F_{sd}}{f_{yd}} = 23.474 \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{eq.24})$$

Com 4 $\phi$ 20 cruzando cada face do pilar tenho  $A_s = 8 \times 3,14 = 25,1 \text{ cm}^2 \geq 23,474 \text{ cm}^2 \longrightarrow OK$

#### 6.5.4 Armadura superior entre painéis – trecho menos solicitado

Foi utilizada a mesma armadura nos dois sentidos. A armadura dimensionada a seguir é localizada entre os painéis, onde surgem os momentos negativos, numa faixa com largura de 1/4 para cada lado, como na laje nervurada tenho um trecho dessa faixa em laje maciça e depois um trecho em nervurada, já com um valor menor para o momento, a armadura foi detalhada de modo a atender a maior armadura encontrada. Ver em anexo planta de armadura para laje nervurada.

$M_{max} = 37,5 \text{ kNm/m}$  – trecho maciço

$$\underline{M_d} := 1.4 \cdot M_{max} = 52.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$\underline{K_{md}} := \frac{M_d}{1\text{m} \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = 0.041$$

$$\underline{K_x} := \frac{\left[ 1 - \left[ 1 - \left( 2 \cdot \frac{K_{md}}{0.85} \right) \right]^{0.5} \right]}{0.8} \quad \underline{K_z} := 1 - 0.4K_x$$

$$K_z = 0.975$$

$$\underline{A_s} := \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} = 5.053 \cdot \text{cm}^2 / \text{m}$$

$M_{max} = 26,1 \text{ kNm/m}$  – trecho com nervuras

$$\underline{M_d} := 1.4 \cdot M_{max} = 36.54 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$\underline{K_{md}} := \frac{M_d}{0.125\text{m} \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = 0.227$$

$$\underline{K_x} := \frac{\left[ 1 - \left[ 1 - \left( 2 \cdot \frac{K_{md}}{0.85} \right) \right]^{0.5} \right]}{0.8} \quad \underline{K_z} := 1 - 0.4K_x$$

$$K_z = 0.841$$

$$\underline{A_s} := \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} = 4.079 \cdot \text{cm}^2 / \text{m}$$

$$A_{adotado} = \phi 10c.15 = 5,33 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

Para o trecho localizado entre esta faixa e a faixa de 1m para cada lado do pilar foi adotada uma armadura intermediária com base no diagrama de distribuição de momentos. Ver planta e armadura em anexo.

## 7. Taxas e Comparativos

Como já observado anteriormente, a laje nervurada não apresentou um bom comportamento para a utilização como laje lisa devido a grande redução de resistência ao corte. A seguir é demonstrado as taxas para a obtenção das taxas para a laje *bubbledeck* e nervurada, utilizando como auxílio as plantas de armaduras em anexo. Na tabela 7.1 os valores comparativos desta taxas. Porém, além das taxas e comparação quantitativa podemos observar que, enquanto a solução em laje nervurada tem como uma de suas características o desconforto causado ao usuário devido ao pouco isolamento acústico proporcionado, a laje *bubbledeck* demonstrou comportamento acústico similar às lajes maciças segundo testes realizados por institutos acadêmicos na Europa.

Para o projeto *bubbledeck* foram obtidas as seguintes taxas de armadura:

- Armadura Inferior do painel – trecho mais solicitado ( $\phi 10c.10$ )  
 $(0,63(\text{kg/m}) \times 8,75(\text{m}) \times 41(\text{barras})) \times 2 / (8,1 \times 8,1) = 6,9 \text{kg/m}^2$
- Armadura Inferior do painel – trecho menos solicitado ( $\phi 10c.20 + \phi 8c.20$ )  
 $(0,63(\text{kg/m}) \times 8,75(\text{m}) \times 20(\text{barras}) + 0,4(\text{kg/m}) \times 8,75(\text{m}) \times 20(\text{barras})) \times 2 / (8,1 \times 8,1) = 5,5 \text{kg/m}^2$
- Armadura Superior do painel ( $\phi 6,3c.10$ )  
 $(0,25(\text{kg/m}) \times 8,1(\text{m}) \times 81(\text{barras})) \times 2 / (8,1 \times 8,1) = 5 \text{kg/m}^2$
- Armadura Superior de Ligação – faixa vão ( $\phi 10c.10$ )  
 $0,63(\text{kg/m}) \times 3,4(\text{m}) \times 40(\text{barras}) \times 2 / (8,1 \times 8,1 \text{m}^2) = 2,61 \text{kg/m}^2$
- Armadura Superior Região de Laje Maciça – faixa pilar ( $\phi 20.10$ )  
 $2,5(\text{kg/m}) \times 4,4(\text{m}) \times 20(\text{barras}) \times 2 / (8,1 \times 8,1 \text{m}^2) = 6,70 \text{kg/m}^2$
- Armadura Superior – faixa intermediária ( $16\phi.10$ )  
 $1,6(\text{kg/m}) \times 4,4(\text{m}) \times 20(\text{barras}) \times 2 / (8,1 \times 8,1 \text{m}^2) = 4,29 \text{kg/m}^2$
- Armadura Colapso Progressivo ( $4\phi 20$ )  
 $2,5(\text{kg/m}) \times 2,7(\text{m}) \times 4(\text{barras}) / (8,1 \times 8,1 \text{m}^2) = 0,41 \text{kg/m}^2$
- Armadura de Punção ( $\phi 10c.10$ )  
 $0,63(\text{kg/m}) \times 1(\text{m}) \times 2(\text{barras}) \times 4 / (8,1 \times 8,1 \text{m}^2) = 0,08 \text{kg/m}^2$

Taxa total de armadura =  $31,49 \text{kg/m}^2$

O volume de concreto total é obtido retirando-se da região onde há esferas o volume das mesmas.

$$\text{Área total} = 65,61 \text{m}^2$$

$$\text{Área de laje maciça} = 5,76 \text{m}^2$$

$$\text{Área de laje } bubbledeck = 59,85 \text{m}^2$$

Espessura total da laje = 0,23m

$$V_{\text{concreto}} = (59,85 \times 0,23 - V_{\text{esferas}}) + 5,76 \times 0,23$$

Para estimar o número de esferas foi usada como referência a tabela 3.1, adotando um número de 23 esferas/m<sup>2</sup>, assim obtemos um total de 1376 esferas.

$$V_{\text{esferas}} = 4/3 \times \pi \times R^3 \times 1376 = 4,20\text{m}^3$$

$$V_{\text{concreto}} = 10,89\text{m}^3$$

A espessura média é de 16,6cm ( $V_{\text{concreto}} / \text{Área total}$ )

$$\text{Assim obtemos uma taxa de } 31,49/0,166 = 189,7\text{kg/m}^3$$

Para o projeto *Atex* foram obtidas as seguintes taxas de armadura:

- Armadura Inferior do painel – trecho mais solicitado  
 $(5 \times (0,63(\text{kg/m}) \times 8,85(\text{m}) \times 2(\text{barras}) + 1(\text{kg/m}) \times 8,85(\text{m}) \times 3(\text{barras})) \times 2 / (8,1 \times 8,1) = 5,75\text{kg/m}^2$
- Armadura Inferior do painel – trecho menos solicitado  
 $(2 \times (0,63(\text{kg/m}) \times 8,85(\text{m}) \times 5(\text{barras})) \times 2 / (8,1 \times 8,1) = 1,70\text{kg/m}^2$
- Armadura Superior do painel ( $\phi 6,3\text{c.15}$ )  
 $(0,25(\text{kg/m}) \times 8,1(\text{m}) \times 54(\text{barras})) \times 2 / (8,1 \times 8,1) = 3,33\text{kg/m}^2$
- Armadura Superior de Ligação = faixa vão ( $\phi 10\text{c.15}$ )  
 $0,63(\text{kg/m}) \times 3,4(\text{m}) \times 28(\text{barras}) \times 2 / (8,1 \times 8,1\text{m}^2) = 1,82\text{kg/m}^2$
- Armadura Superior Região de Laje Maciça – faixa pilar ( $\phi 20.15$ )  
 $2,5(\text{kg/m}) \times 4,4(\text{m}) \times 13(\text{barras}) \times 2 / (8,1 \times 8,1\text{m}^2) = 4,36\text{kg/m}^2$
- Armadura Superior Região de Laje Maciça – faixa intermediária ( $16\phi.15$ )  
 $1,6(\text{kg/m}) \times 4,4(\text{m}) \times 14(\text{barras}) \times 2 / (8,1 \times 8,1\text{m}^2) = 3,0\text{kg/m}^2$
- Armadura Colapso Progressivo ( $4\phi 20$ )  
 $2,5(\text{kg/m}) \times 2,7(\text{m}) \times 4(\text{barras}) / (8,1 \times 8,1\text{m}^2) = 0,41\text{kg/m}^2$
- Armadura de Punção ( $\phi 8\text{c.10}$ )  
 $0,40(\text{kg/m}) \times 1,2(\text{m}) \times 2(\text{barras}) \times 4 / (8,1 \times 8,1\text{m}^2) = 0,06\text{kg/m}^2$

$$\text{Taxa total de armadura} = 20,43\text{kg/m}^2$$

O volume de concreto total obtido é:

$$\text{Área total} = 65,61\text{m}^2$$

$$\text{Área de laje maciça} = 28,09\text{m}^2$$

$$\text{Área de laje } Atex = 37,52\text{m}^2$$

$$\text{Altura total da laje} = 0,275\text{m}$$

$$V_{\text{concreto}} = 28,09 \times 0,275 + 37,52 \times 0,132 = 12,68\text{m}^3$$

A espessura média é de 19,3cm ( $V_{\text{concreto}} / \text{Área total}$ )

$$\text{Assim obtemos uma taxa de } 20,43/0,193 = 105,9\text{kg/m}^3$$

Tabela 7.1 – Comparativo

	Bubbledeck	Nervurada
Volme de concreto (m <sup>3</sup> )	10,89	12,68
Aço(kg/m <sup>2</sup> )	31,49	20,43
Taxa(kg/m <sup>3</sup> )	189,7	105,9
espsura média(cm)	16,6	19,3

## 8. Conclusões

A nova solução apresentada, a laje *bubbledeck*, tem-se mostrado bastante aplicável, tendo em vista os resultados dos testes desenvolvidos em diversas instituições acadêmicas, além dos diversos projetos já executados em todo o mundo. É importante salientar também que novas soluções construtivas estão sempre aparecendo de maneira de melhorar a construção civil como um todo, tendo como objetivo metodologias mais econômicas e práticas, que sejam também adaptadas às necessidades atuais, tais como a diminuição de resíduos produzidos e também o uso de materiais ecologicamente corretos. A solução mostrou-se também bastante simples tanto em termos do dimensionamento adaptado a Norma Brasileira quanto à sua construção.

Inicialmente foi prevista a comparação da laje *bubbledeck* com a laje nervurada, que é um tipo já bastante utilizado no Brasil, porém a utilização do mesmo modelo estrutural, em laje cogumelo, para ambas soluções mostrou-se ineficaz já que a laje nervurada não se apresentou como uma boa solução para este tipo de estrutura, necessitando dos já citados anteriormente, trechos de laje maciça, as “vigas chatas”. Sendo a comparação feita a partir do mesmo modelo estrutural, a laje *bubbledeck* mostrou uma economia de concreto maior que a laje nervurada porém um consumo de aço bem maior do que a nervurada, um dos fatores que ocasionaram essa grande diferença foi a escolha da comparação devido a capacidade de carga, assim a laje nervurada devido a maior altura tem uma altura útil maior, diminuindo as taxas de armadura. Outra comparação poderia ter sido feita utilizando a laje *bubbledeck* com altura de 28cm, onde provavelmente se encontrariam valores de taxas mais próximos. Além dos aspectos econômicos é importante salientar as diferenças para o conforto e utilização do usuário, como o isolamento acústico, que passam a ser cada vez mais importantes para certificação de qualidade das construções, onde a *bubbledeck* possui mais vantagens do que a nervurada.

Em relação a oportunidade que tive de acompanhar o primeiro projeto a ser executado no Brasil com a aplicação da tecnologia *bubbledeck*, foi de grande valia para minha formação, podendo aplicar e observar na prática diversos conceitos abordados ao longo do curso de graduação. Cabe também ressaltar que, como a tecnologia *bubbledeck* foi adaptada ao projeto original da obra, sem grandes alterações neste, não foi possível obter melhorias que poderiam ser advindas desta tecnologia, tais como a diminuição das cargas das fundações e um maior espaçamento entre os pilares.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se fazer uma comparação utilizando modelos independentes para as diferentes lajes a serem comparadas, além da realização de teste de avaliação, de modo a confirmar os dados fornecidos pelo detentor da tecnologia.

## **Bibliografia**

**ABNT NBR 6118:2003** – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento, versão corrigida, ABNT, 2003.

**DIN 1045:2001 - Concrete** – German code for the design of concrete structures, 2001.

**EN 13747:2005 - Concrete** – Precast concrete products – Floor plates for floor systems, 2005.

**Construções de concreto – Princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado**, Leonhardt, F., Monnig, E., Interciência Editora, vol.3, 1979.

**Lajes em concreto armado e protendido**, De Souza, V. C. M., Da Cunha, A. J. P., EDUFF, 1994.

**Tratado de Concreto Armado**, Guerrin, A., Hemus, vol.3.

**Eboli, C. R.**, Notas de Aula – Concreto Armado, 2007.

**Bubbledeck Design Guide**, Catálogo Técnico de Produtos.

**Investigations on the shear capacity of biaxial hollow slabs**, Aldejohann, M., Schnellenbach-Held, M., 2002.

**MathCad Version 14** – Parametric Technology Corporation

**SAP2000 v10 – Integrated Software For Structural Analysis and Design** - Advanced Version 10.0.7 – Computers and Structures, Inc.

## **ANEXOS 1**

Painéis Típicos

## **ANEXOS 2**

Plantas de Armadura

## **ANEXOS 3**

### Diagramas de Distribuição de Momentos

## **ANEXOS 4**

### Catálogos

## **ANEXOS 5**

Plantas Obra de Salvador