

INDICE

1.INTRODUÇÃO	3
2.OBJETIVO	4
3.CÁLCULO PELO MÉTODO SIMPLIFICADO X CÁLCULO COMO PLACAS ISOLADAS	5
3.1 Caixa d`água Vazia	6
3.1.1 Parede XZ (Par 1 e Par 3)	7
3.1.2. Parede YZ (Par 4 e Par 5)	9
3.1.3 Tampa	11
3.1.4. Fundo	13
3.2 Caixa d`água Cheia	15
3.2.1 Parede XZ (Par 1 e Par 3)	16
3.2.2. Parede YZ (Par 4 e Par 5)	18
3.2.3 Tampa	20
3.2.4. Fundo	22
3.3 Tabela de comparação dos resultados	24
4.CÁLCULO ELABORADO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	25
4.1 Definição dos Parâmetros das molas	27
4.2 Definição da abertura na tampa	32
4.3 Resultados	33
4.3.1 Caixa d`água Vazia	33
4.3.1.1 Parede XZ (Par 1 e Par 3)	33
4.3.1.2 Parede YZ (Par 4 e Par 5)	34
4.3.1.3 Tampa	35
4.3.1.4 Fundo	36
4.3.2 Caixa d`água Cheia	37
4.3.2.1 Parede XZ (Par 1 e Par 3)	39
4.3.2.2 Parede YZ (Par 4 e Par 5)	40
4.3.2.3 Tampa	41
4.3.2.4 Fundo	42
4.4 Tabelas de resultados	43
5. CONCLUSÃO	46

6. ANEXOS 47

6.1 Planta de forma Caixa d`água..... 47

6.2 Desenho de armação Caixa d`água 47

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 47

1.Introdução

Neste trabalho, é projetada e calculada uma caixa d'água enterrada de 10,40m de largura, 10,60m de comprimento e 4,13m de altura. O nível d'água da caixa se encontra a 3,20 m do fundo do reservatório e o nível do terreno se encontra a 3,07 m. O lençol d'água do terreno não foi considerado neste trabalho (ver planta em anexo). Essa foi inicialmente uma caixa d'água do canteiro de obra da Refinaria do Paraná que foi modificada para uma análise mais elaborada.

Pode-se considerar essa caixa d'água de grande porte por isso é necessário subdividi-la em duas células através de uma parede intermediária, de forma a diminuir as dimensões das lajes que a compõem, servindo também como um artifício para manutenção e limpeza.

Os materiais a serem utilizados serão, aço CA50, concreto estrutural com fck igual a 20 MPa e concreto magro com fck igual a 9 MPa que será utilizado na camada embaixo do fundo servindo para regularização do terreno.

Quantidades:

- Área de forma = $518,00 \text{ m}^2$
- Volume de concreto estrutural= $89,00\text{m}^3$
- Volume de concreto magro= $6,00\text{m}^3$

Carregamentos:

As cargas que atuam são: Peso próprio, revestimento, cargas acidentais, empuxo d'água e empuxo de terra.

2.Objetivo

O objetivo desse trabalho é projetar e analisar um reservatório enterrado de concreto armado por dois métodos diferentes.

Inicialmente é feita uma análise por um método simplificado em que as paredes, a tampa e o fundo do reservatório são calculados separadamente como placas, em seguida são comparados com os resultados obtidos através do programa de elementos finitos onde as paredes, a tampa e o fundo do reservatório são calculados separadamente como placas.

Em uma segunda etapa o reservatório é analisado por um modelo tridimensional usando o Método dos Elementos Finitos.

O Método dos Elementos Finitos é uma metodologia poderosa para a análise de estruturas. A técnica permite a avaliação global do estado de tensão de um determinado ponto, e por ser um método numérico elaborado, dispensa algumas simplificações, normalmente inerentes aos métodos de cálculo simplificados, tais como condições do terreno (substituição por molas) condições de contorno, e etc.

Entretanto, os resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos, através de programas computacionais (SAP 2000 foi o programa utilizado no desenvolvimento desse trabalho) devem ser sempre verificados, uma vez que são comuns erros de usuários ao se utilizar esse tipo de programas. Dentre os erros mais comuns são: erros de unidades, confusão entre eixos locais e globais e etc...

3.Cálculo pelo Método simplificado X Cálculo como Placas Isoladas

A Caixa d'água foi calculada pelas tabelas de laje [5] e também modelada com o programa SAP 2000 como placas isoladas. Foram estudadas as três hipóteses de cálculo: Caixa Vazia, um lado cheio e outro vazio e totalmente cheia.

OBS: Poderiam ter sido considerados efeitos de cargas como: água empoçada na tampa, efeito de compactação, efeito de empuxo devido a cargas acidentais, águas pluviais e para o empuxo do terreno poderia ter sido usado o coeficiente de empuxo no repouso ($k = 0,5$).

Carregamentos

-Tampa

Peso Próprio $0,12 \times 25 = 3,0 \text{ kN/m}^2$

Sobrecarga $3,0 \text{ kN/m}^2$

Revestimento $0,5 \text{ kN/m}^2$

Total $6,5 \text{ kN/m}^2$

-Fundo

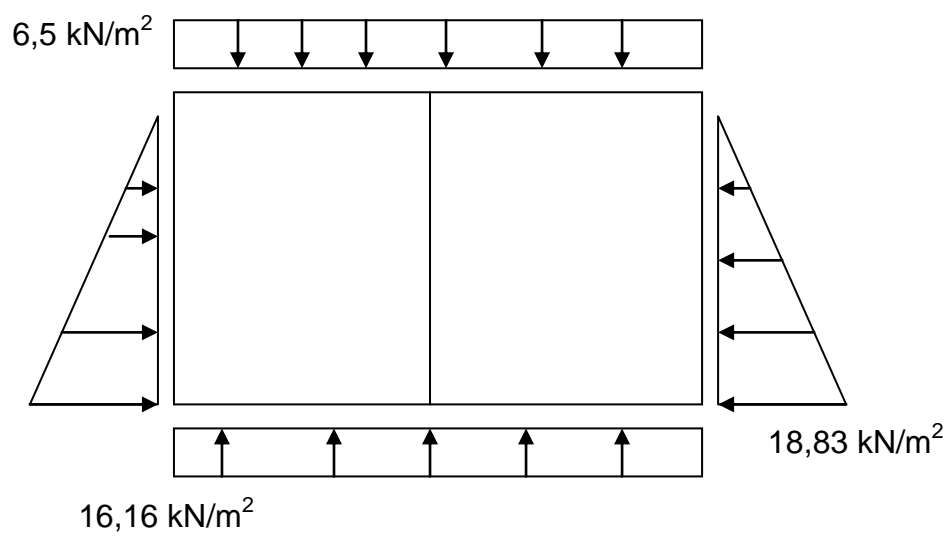
Carga da tampa $6,5 \text{ kN/m}^2$

Paredes $\{ (2 \times 10,2 + 3 \times 10,4) 3,97 \times 25 \times 0,2 \} / (10,2 \times 10,4) = 9,66 \text{ kN/m}^2$

Total $16,16 \text{ kN/m}^2$

3.1 Caixa d'água Vazia

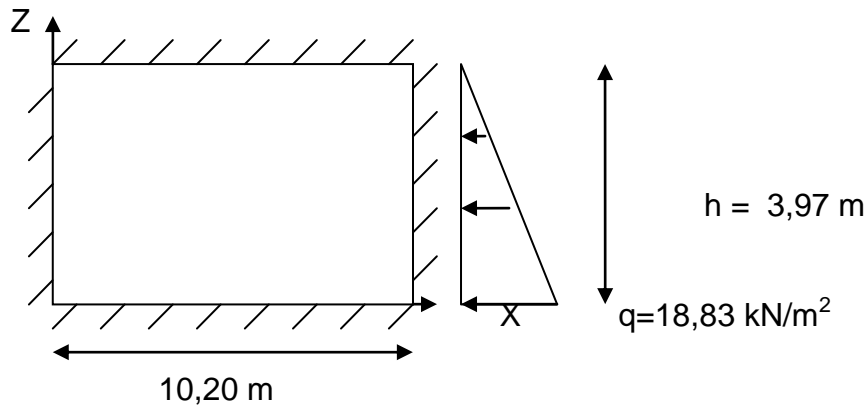
1ª Hipótese-Vazia



$$\text{Terra} - 18 \times 0,33 \times 3,17 = 18,83 \text{ kN/m}^2$$

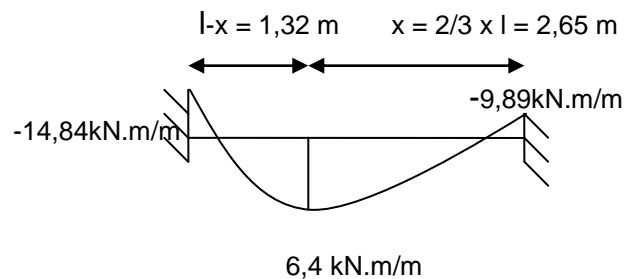
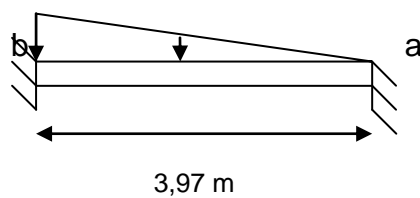
3.1.1 Parede XZ (Par 1 e Par 3)

Cálculo pelo método simplificado



Como $10,20/3,97 \gg 2$ Logo, armação em uma só direção

$$q = 18,83 \text{ kN/m}^2$$



$$M_a = -q l^2/30 = -18,83 \times 3,97^2/30 = -9,89 \text{ kN.m/m}$$

$$M_b = -q l^2/20 = -18,83 \times 3,97^2/20 = -14,84 \text{ kN.m/m}$$

$$M_{x_{\max}} = -\frac{ql^2}{46,6} = 6,4 \text{ kN.m/m}$$

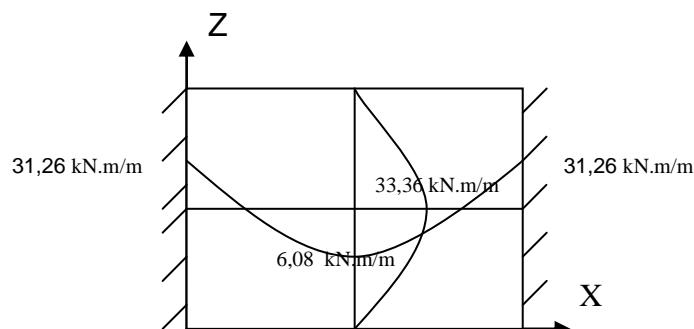
$$x = 2/3 l = 2/3 \cdot 3,97 = 2,65 \text{ m}$$

Para o cálculo dos momentos na direção x será usado as tabelas de lajes [5] para uma relação de lados $a/b = 0,5$

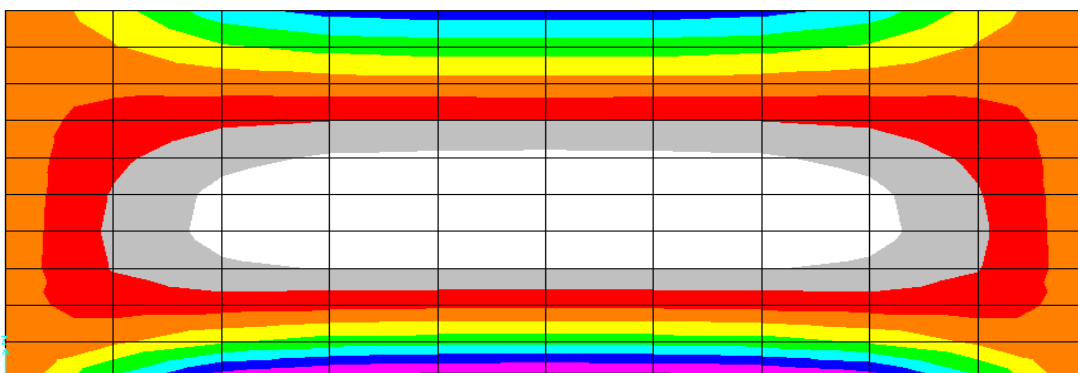
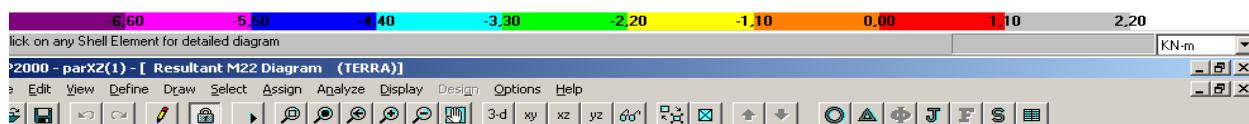
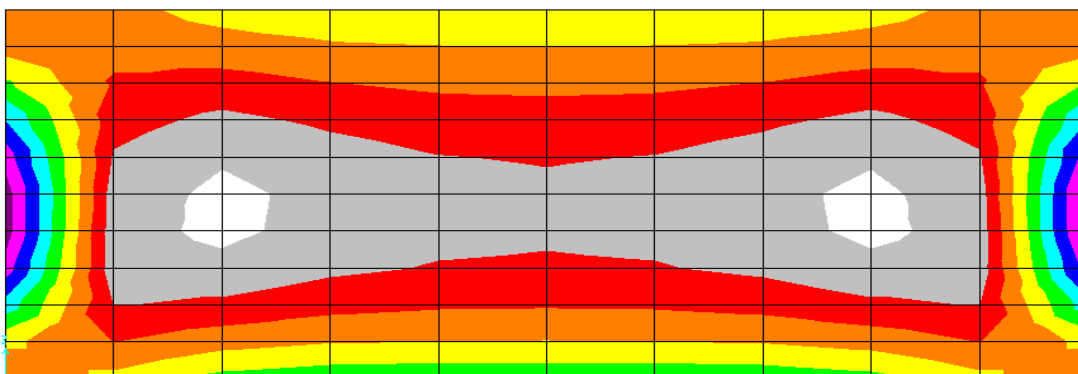
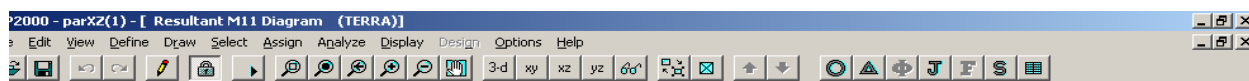
$$P1 \times l z^2 = 33,0 \times 3,97^2 = 520,11$$

$$M_{x_{\text{apoio}}} = -520,11 \times 0,0601 = -31,26 \text{ kN.m/m}$$

$$M_{x_{\text{meio}}} = 520,11 \times 0,0117 = 6,08 \text{ kN.m/m}$$



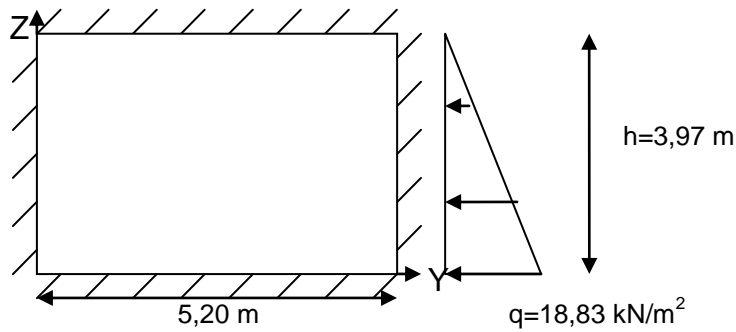
Vazia
Parede XZ (Par 1 e Par 3)



3.1.2. Parede YZ (Par 4 e Par 5)

Calculo pelo método simplificado

Paredes YZ



Como $5,20/3,97 \approx 1,30 \ll 2$ Logo, armação em duas direções

$$P1 \times lz^2 = 18,83 \times 3,97^2 = 296,78$$

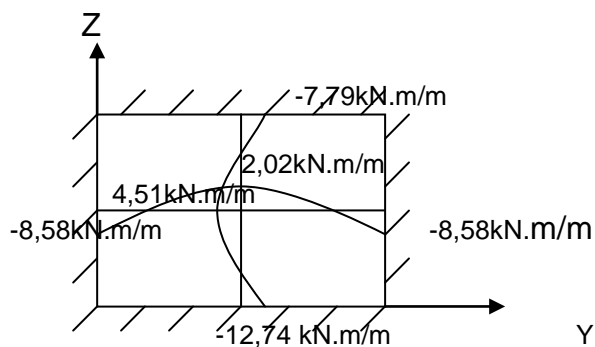
$$M_{z_{\text{apoio}(z=0)}} = -296,78/23,3 = -12,74 \text{ kN.m/m}$$

$$M_{z_{\text{apoio}(z=lz)}} = -296,78/38,1 = -7,79 \text{ kN.m/m}$$

$$M_{z_{\text{meio}(\text{max})}} = 296,78/65,8 = 4,51 \text{ kN.m/m}$$

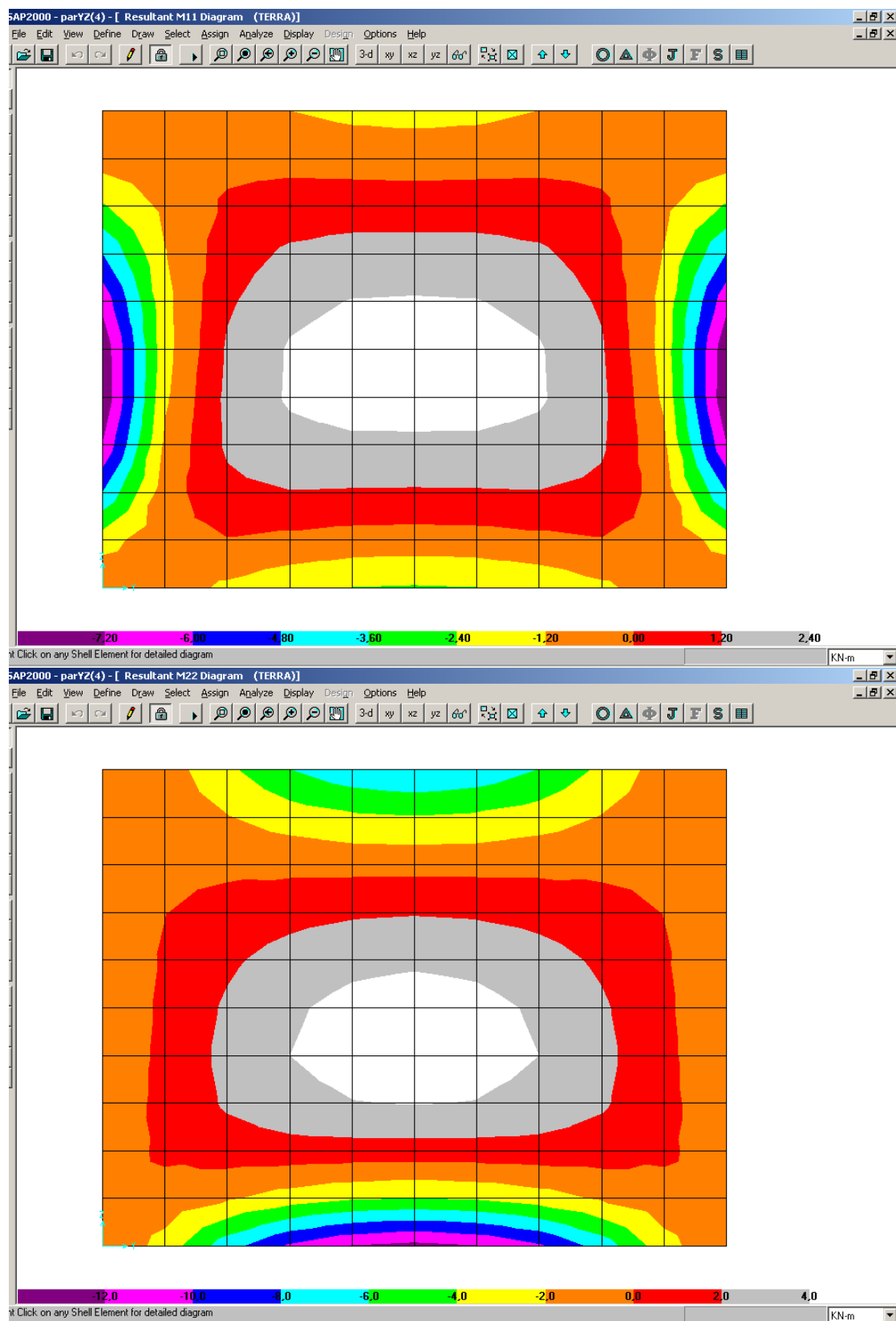
$$M_{y_{\text{apoio}(\text{min})}} = -296,78/34,6 = -8,58 \text{ kN.m/m}$$

$$M_{y_{\text{meio}(\text{max})}} = 296,78/147 = 2,02 \text{ kN.m/m}$$



Esta parede foi também calculada pelo Método dos Elementos Finitos. Os diagramas de momentos fletores estão mostrados a seguir

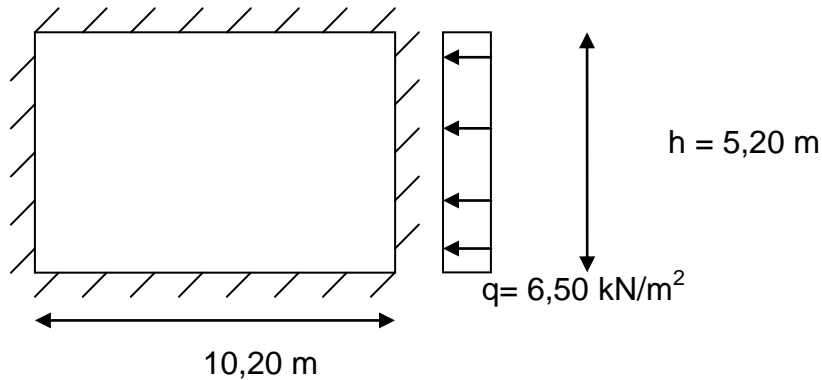
Vazia
Parede YZ (Par 4 e Par 5)



3.1.3 Tapa

Calculo pelo método simplificado

Tapa



Como $l_x/l_y = 10,20/5,20 \approx 1,95 < 2$ Logo, armação em duas direções

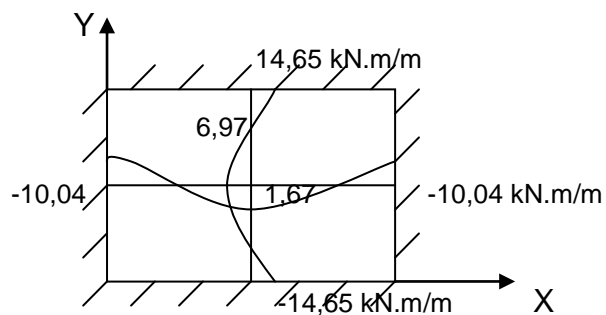
$$P \times l_y^2 = 6,50 \times 5,20^2 = 175,76$$

$$M_{y(\text{apoio})} = -175,76/12,0 = -14,65 \text{ kN.m/m}$$

$$M_{y(\text{meio})} = 175,76/25,2 = 6,97 \text{ kN.m/m}$$

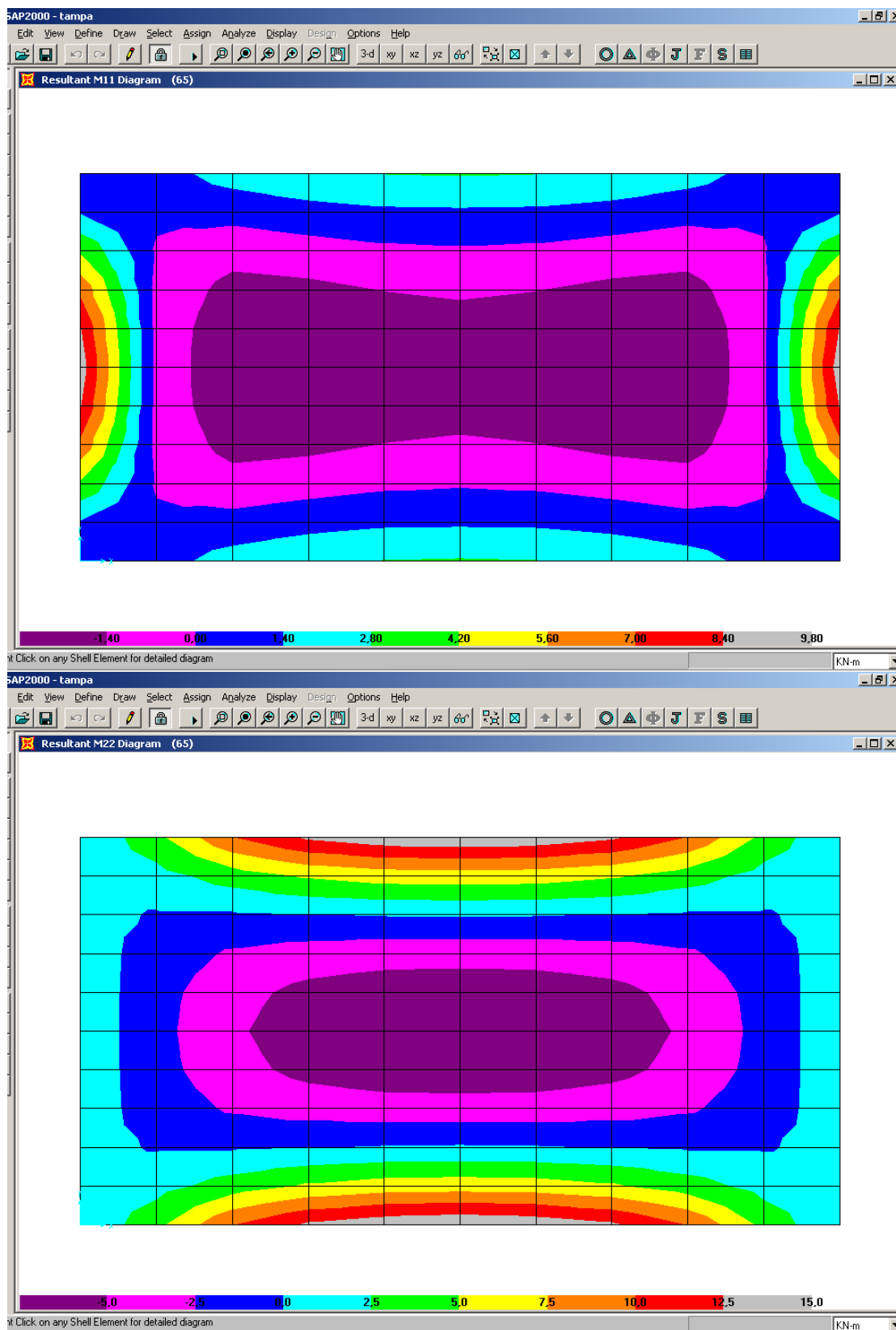
$$M_{x(\text{apoio})} = -296,78/17,5 = -10,04 \text{ kN.m/m}$$

$$M_{x(\text{meio})} = 175,76/105 = 1,67 \text{ kN.m/m}$$



A tampa foi também calculada pelo Método dos Elementos Finitos. Os diagramas de momentos fletores estão mostrados a seguir

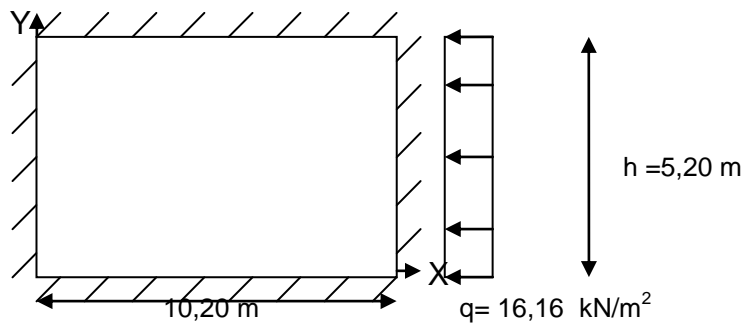
Tampa



3.1.4. Fundo

Cálculo pelo método simplificado

Fundo



Como $l_x/l_y = 10,20/5,20 \approx 1,95 < 2$ Logo, armação em duas direções

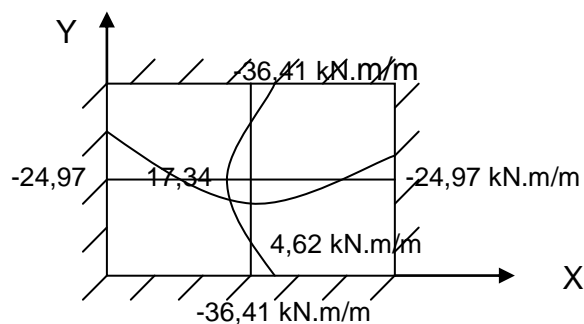
$$P \times l_y^2 = 16,16 \times 5,20^2 = 436,97$$

$$M_{y(\text{apoio})} = -436,97/12,0 = -36,41 \text{ kN.m/m}$$

$$M_{y(\text{meio})} = 436,97/25,2 = 17,34 \text{ kN.m/m}$$

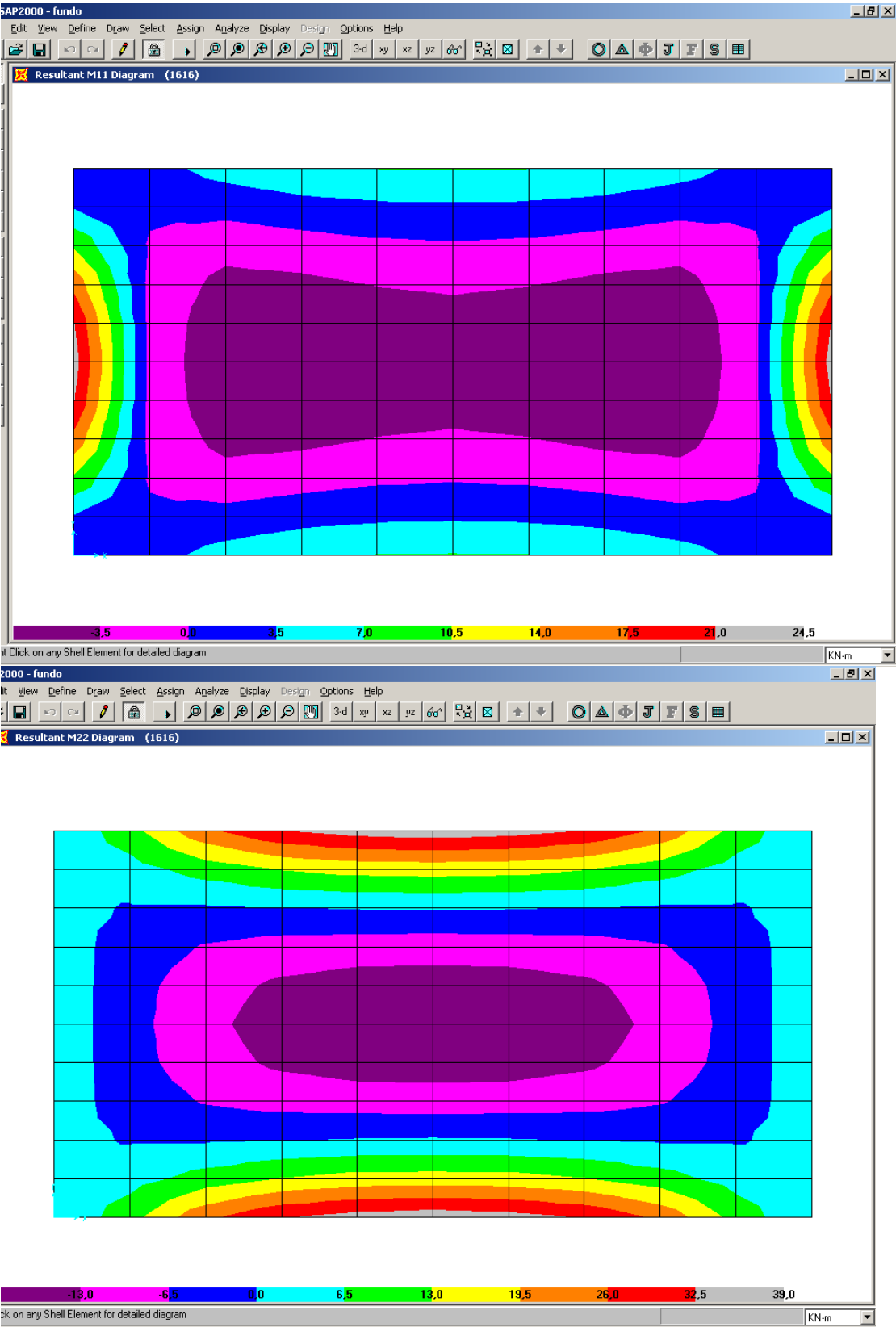
$$M_{x(\text{apoio})} = -436,97/17,5 = -24,97 \text{ kN.m/m}$$

$$M_{x(\text{meio})} = 436,97/105 = 4,62 \text{ kN.m/m}$$



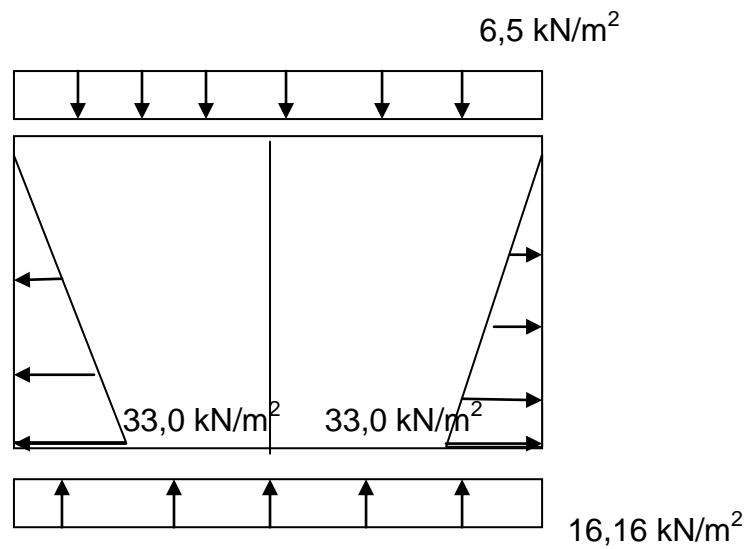
O Fundo foi também calculado pelo Método dos Elementos Finitos. Os diagramas de momentos fletores estão mostrados a seguir

Fundo



3.2 Caixa d'água Cheia

2ª Hipótese- Todo cheio (sem terra)

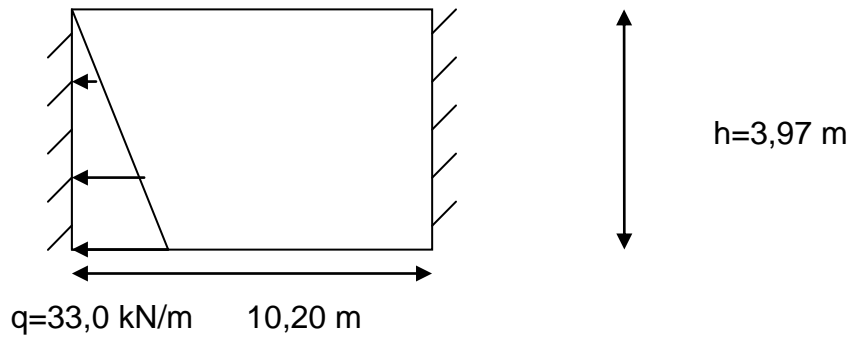


$$\text{Água} = 3,30 \times 10 = 33,0 \text{ kN/m}^2$$

3.2.1 Parede XZ (Par 1 e Par 3)

Calculo pelo método simplificado

Paredes XZ



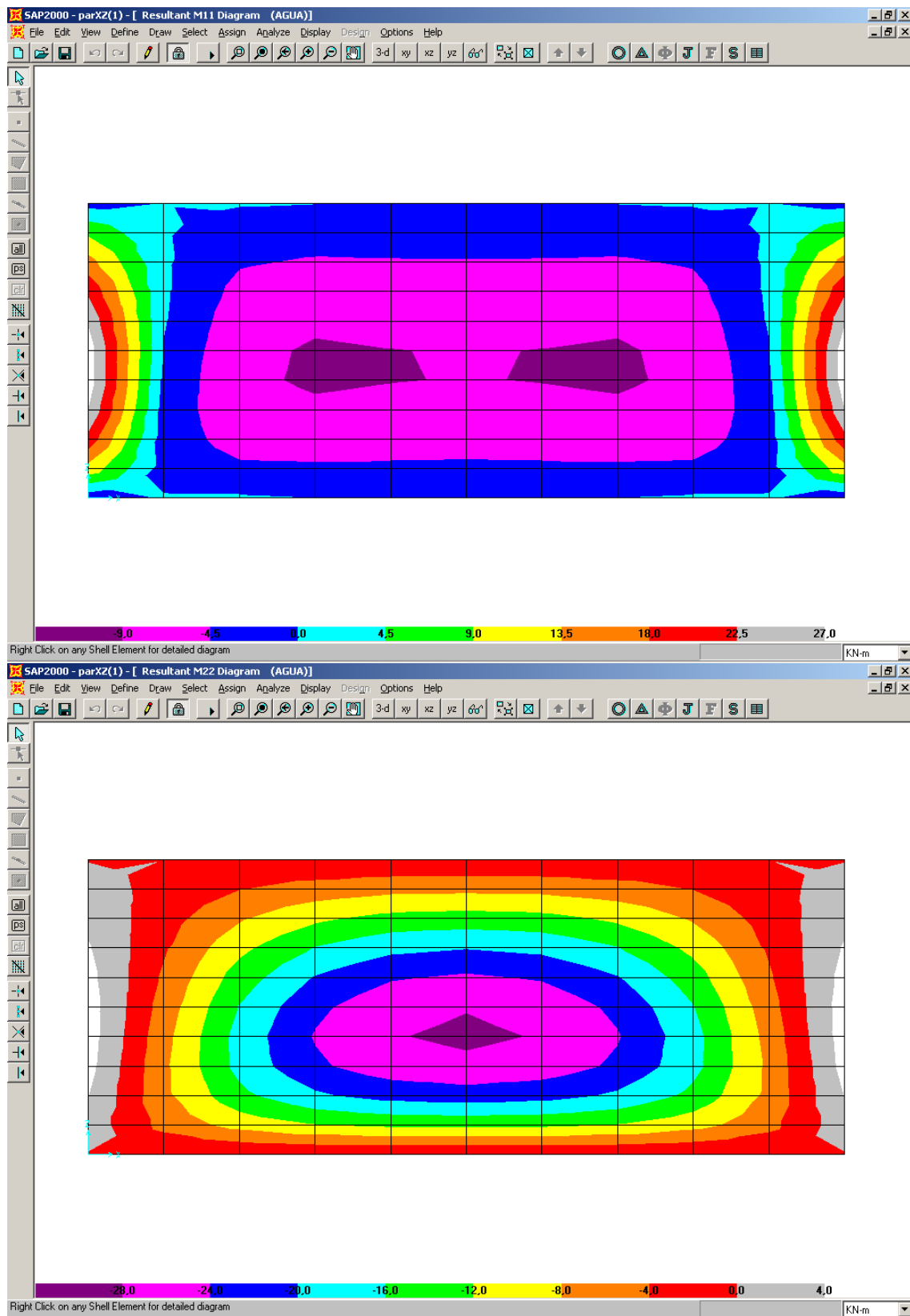
Como $10,20/3,97 \gg 2$ Logo, armação em uma só direção



$$M = -\frac{ql^2}{15,59} = -\frac{33,0 \times 3,97^2}{15,59} = 33,36 \text{ kN.m/m}$$

Cheia

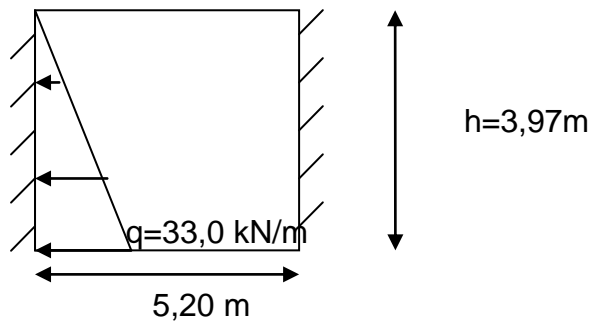
Parede XZ



3.2.2. Parede YZ (Par 4 e Par 5)

Calculo pelo método simplificado

Paredes YZ



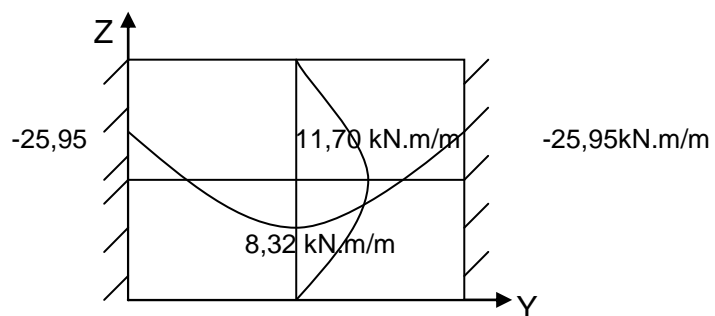
Como $3,97/5,20 \approx 0,75 >> 0,5$ Logo, armação em duas direções

$$P \times ly^2 = 33,0 \times 3,97^2 = 520,11$$

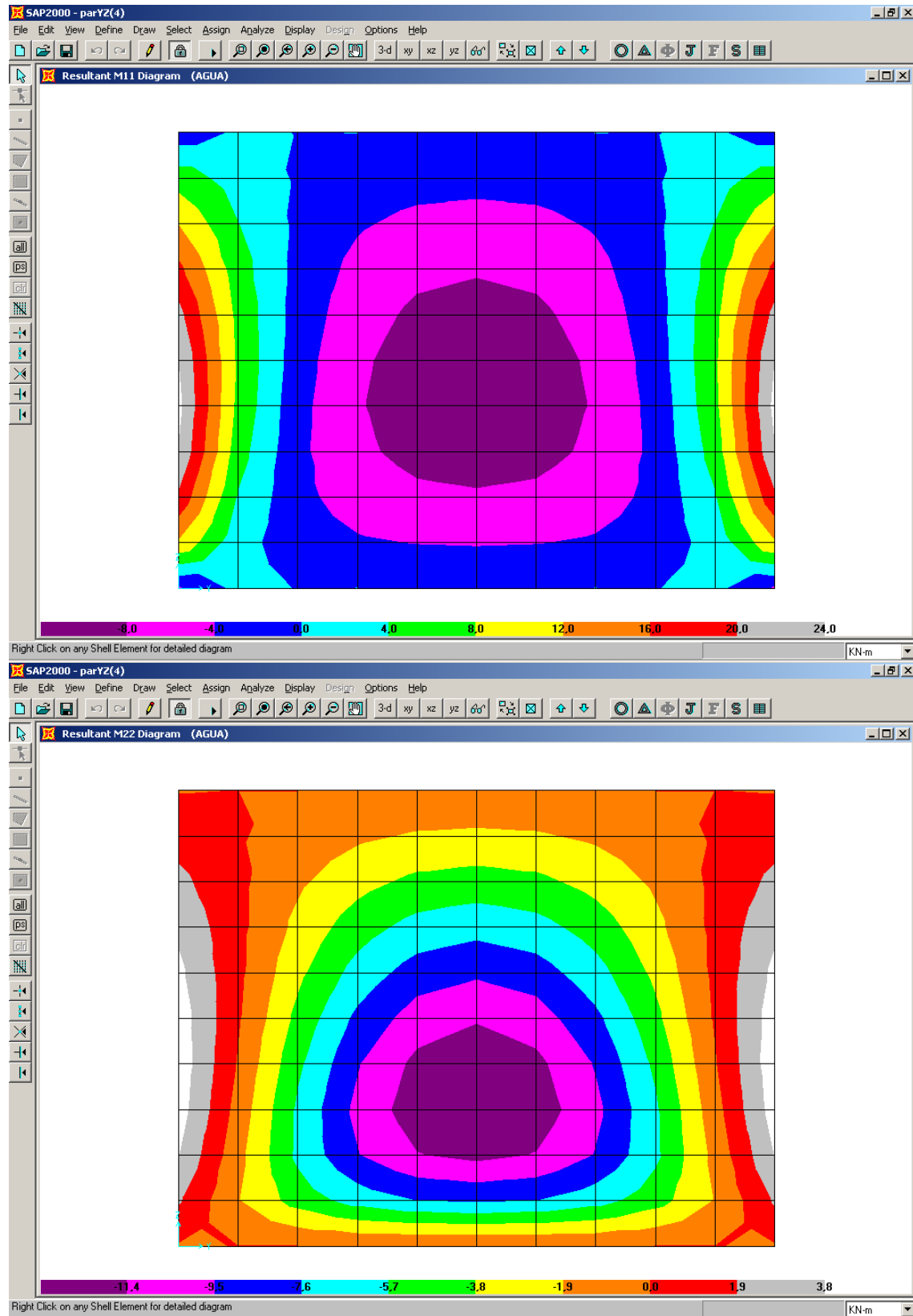
$$MY_{\text{erm}(Y=0)} = 520,11 \times -0,0499 = -25,95 \text{ kNm/m}$$

$$MY_{\text{erm}(\text{max})} = 520,11 \times 0,0160 = 8,32 \text{ kNm/m}$$

$$MZ_{\text{erm}(\text{max})} = 520,11 \times 0,0225 = 11,70 \text{ kNm/m}$$



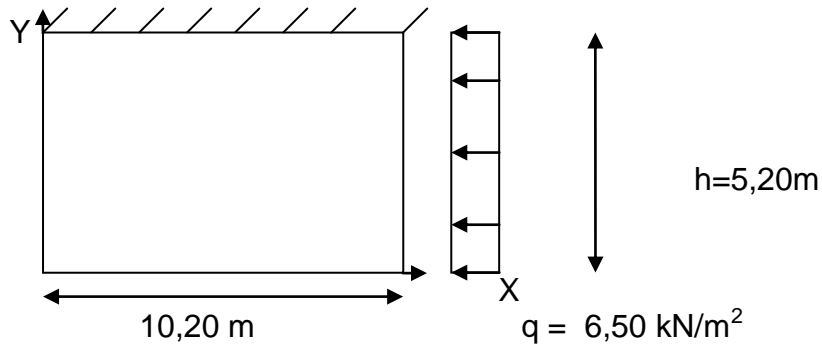
Pared YZ



3.2.3 Tampa

Cálculo pelo método simplificado

Tampa



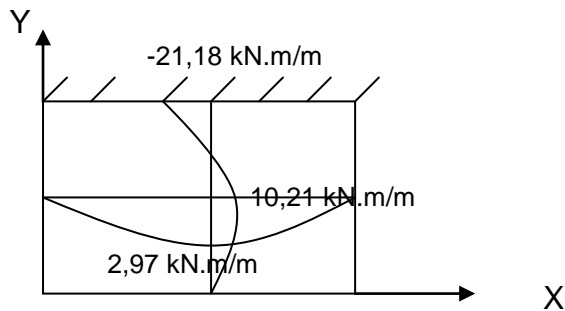
Como $l_x/l_y = 10,20/5,20 \approx 1,95 < 2$ Logo, armação em duas direções

$$P \times l_y^2 = 6,50 \times 5,20^2 = 175,76$$

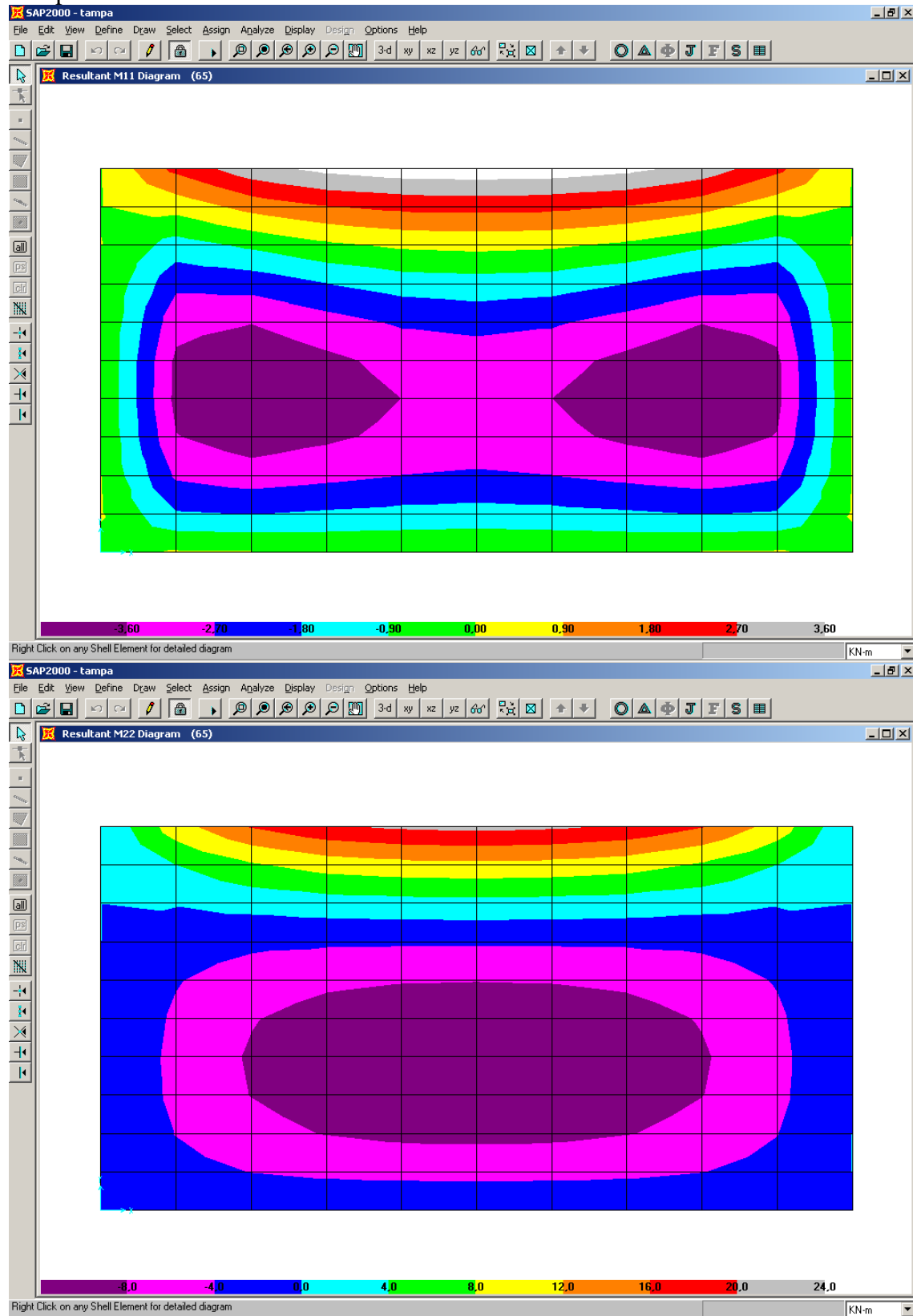
$$M_{y(\text{meio})} = 175,76/17,2 = 10,21 \text{ kN.m/m}$$

$$M_{y(\text{apoio})} = -175,76/8,3 = -21,18 \text{ kN.m/m}$$

$$M_{x(\text{meio})} = 175,76/59,1 = 2,97 \text{ kN.m/m}$$



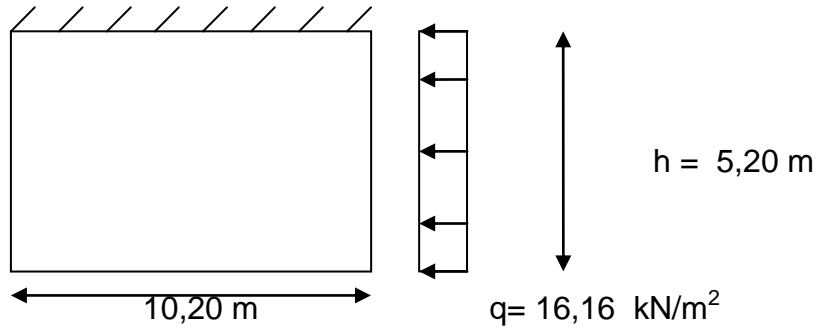
Tampa



3.2.4. Fundo

Calculo pelo método simplificado

Fundo



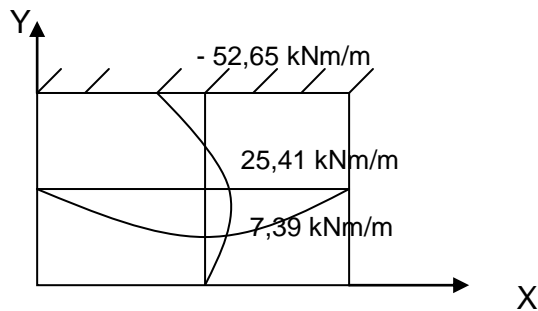
Como $l_x/l_y = 10,20/5,20 \approx 1,95 < 2$ Logo, armação em duas direções

$$P \times l_y^2 = 16,16 \times 5,20^2 = 436,97$$

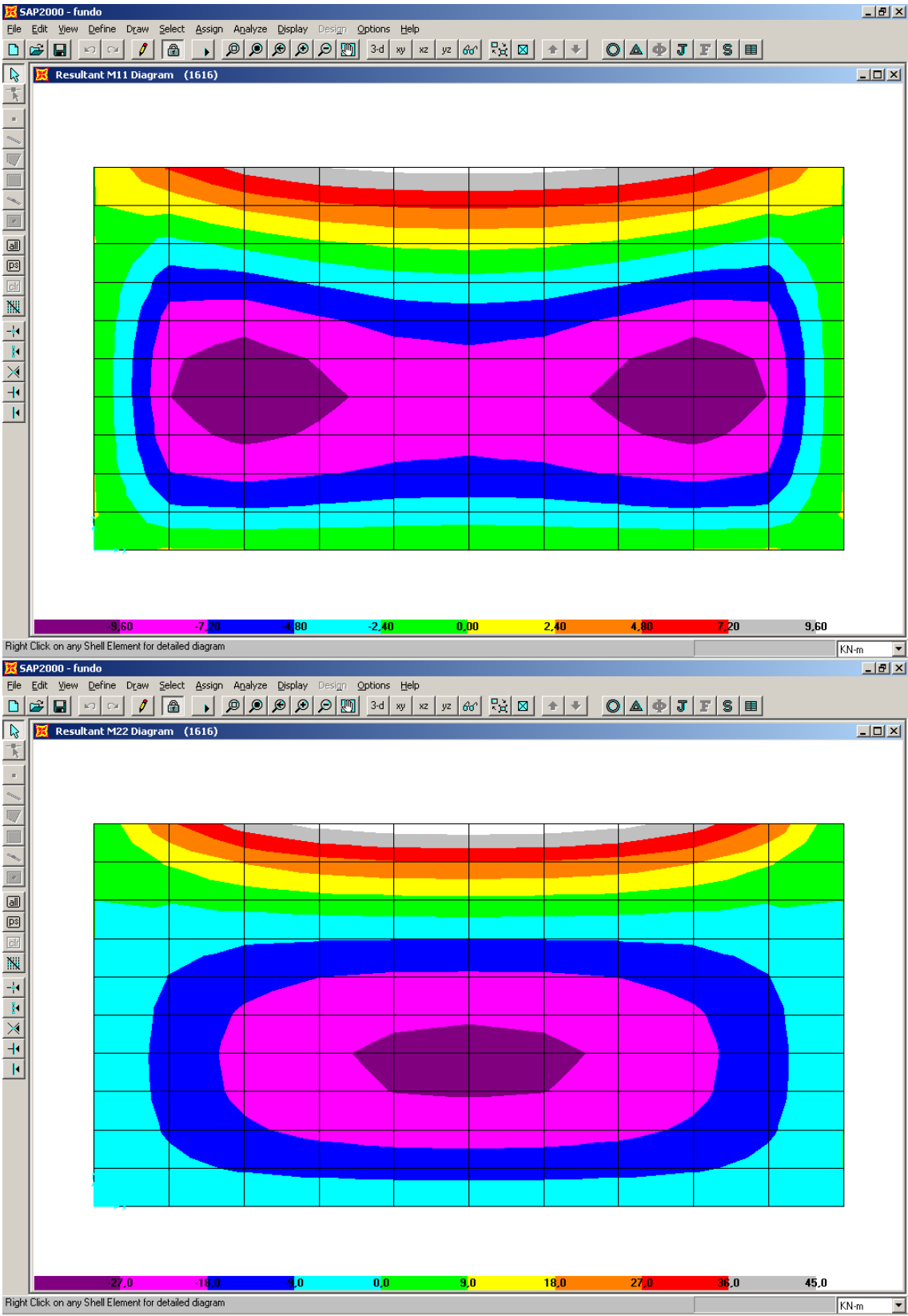
$$M_{y(\text{meio})} = 436,97/17,2 = 25,41\text{ kN.m/m}$$

$$M_{y(\text{apoio})} = -436,97/8,3 = -52,65\text{ kN.m/m}$$

$$M_{x(\text{meio})} = -436,97/59,1 = 7,39\text{ kN.m/m}$$



Fundo



3.3 Tabela de comparação dos resultados

Tabela Comparativa (kN.m/m)			Método simplificado				Método dos elementos Finitos			
			Max apoio		Max meio laje		Max apoio		Max meio laje	
			Mexterno	Minterno	Mexterno	Minterno	Mexterno	Minterno	Mexterno	Minterno
Parede XZ (Par 1 e Par 3)	Vazia	M11(horz)	-	-	-	-	-6,60	-	-	2,20
		M22(vert)	-14,84	-	-	6,4	-13,20	-	-	4,40
	Cheia	M11(horz)	-	-31,26	6,08	-	-	-27,00	9,00	-
		M22(vert)	-	-	33,36	-	-	-	28,00	-
Parede YZ (Par 4 e Par 5)	Vazia	M11(horz)	-8,58	-	-	2,02	-7,20	-	-	2,40
		M22(vert)	-12,74	-	-	4,51	-12,00	-	-	4,00
	Cheia	M11(horz)		-25,95	8,32		-	-24,00	8,00	-
		M22(vert)			11,70		-	-	11,40	-
Tampa	Vazia	M11(horz)	-10,04	-	-	1,67	-9,80	-	-	1,40
		M22(vert)	-14,65	-	-	6,97	-15,00	-	-	5,00
	Cheia	M11(horz)	-	-	-	2,97	-	-	-	3,60
		M22(vert)	-21,18	-	-	10,21	-24,00	-	-	8,00
Fundo	Vazia	M11(horz)	-24,97	-	-	4,62	-24,50	-	-	3,50
		M22(vert)	-36,41	-	-	17,34	-39,00	-	-	13,00
	Cheia	M11(horz)	-	-	-	7,39	-	-	-	9,60
		M22(vert)	-52,65	-	-	25,41	-49,50	-	-	27,00

Devido ao pouco refinamento da malha alguns resultados do Método dos Elementos Finitos podem não apresentar uma precisão ideal, que seria obtida com uma malha bem refinada.

4.Cálculo elaborado pelo Método dos Elementos Finitos

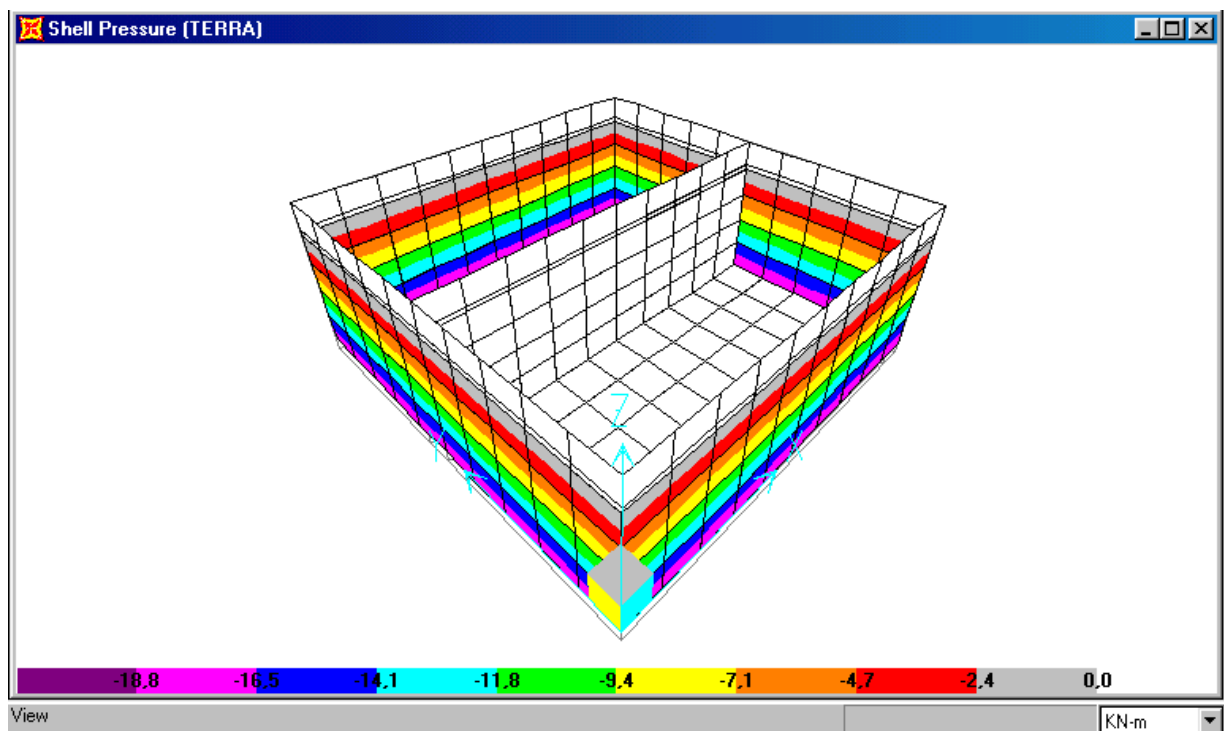
Modelo tridimensional usando o Método dos elementos finitos

A Caixa d'água foi modelada com o elemento finito de casca do programa SAP 2000 [6]. Foram estudadas as três hipóteses de cálculo que estão citadas anteriormente: Caixa Vazia, um lado cheio e outro vazio e totalmente cheia.

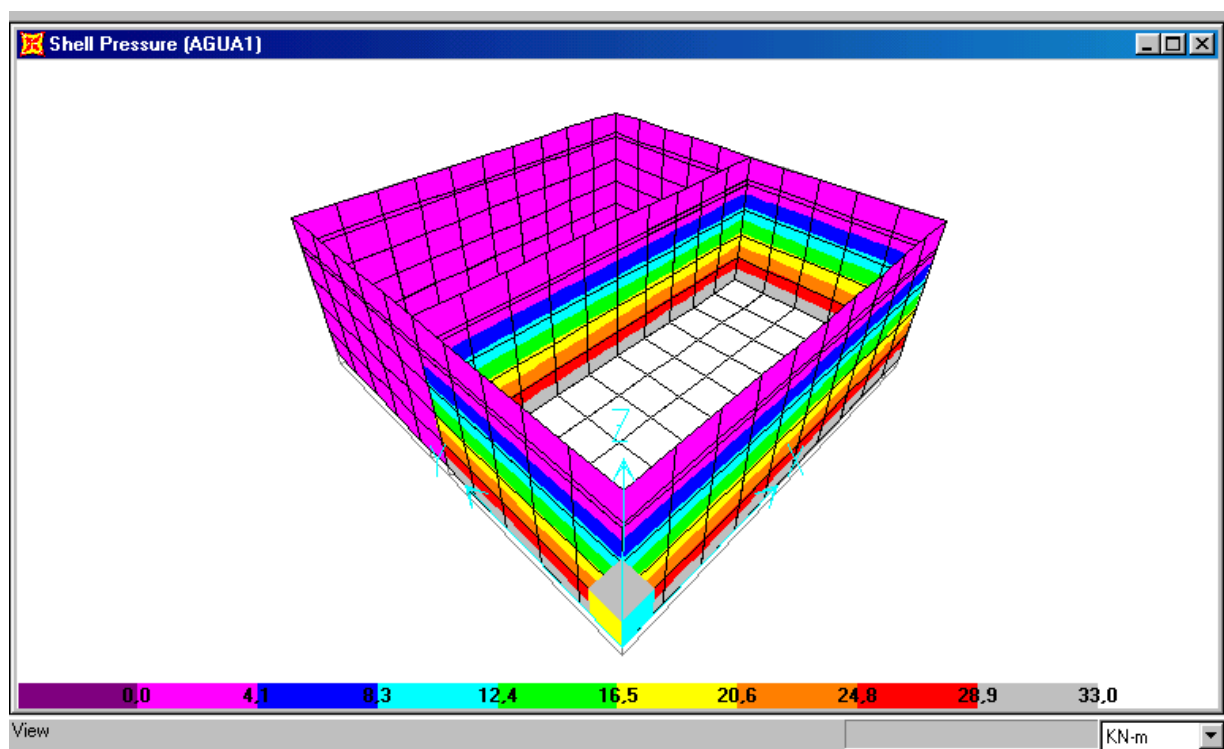
Para a representação do solo foram utilizados molas nos nós do fundo , com K_z descrito no item 4.1

Nas figuras seguintes estão mostrados modelos da caixa d' água sem a tampa com a pressão atuantes nas paredes.

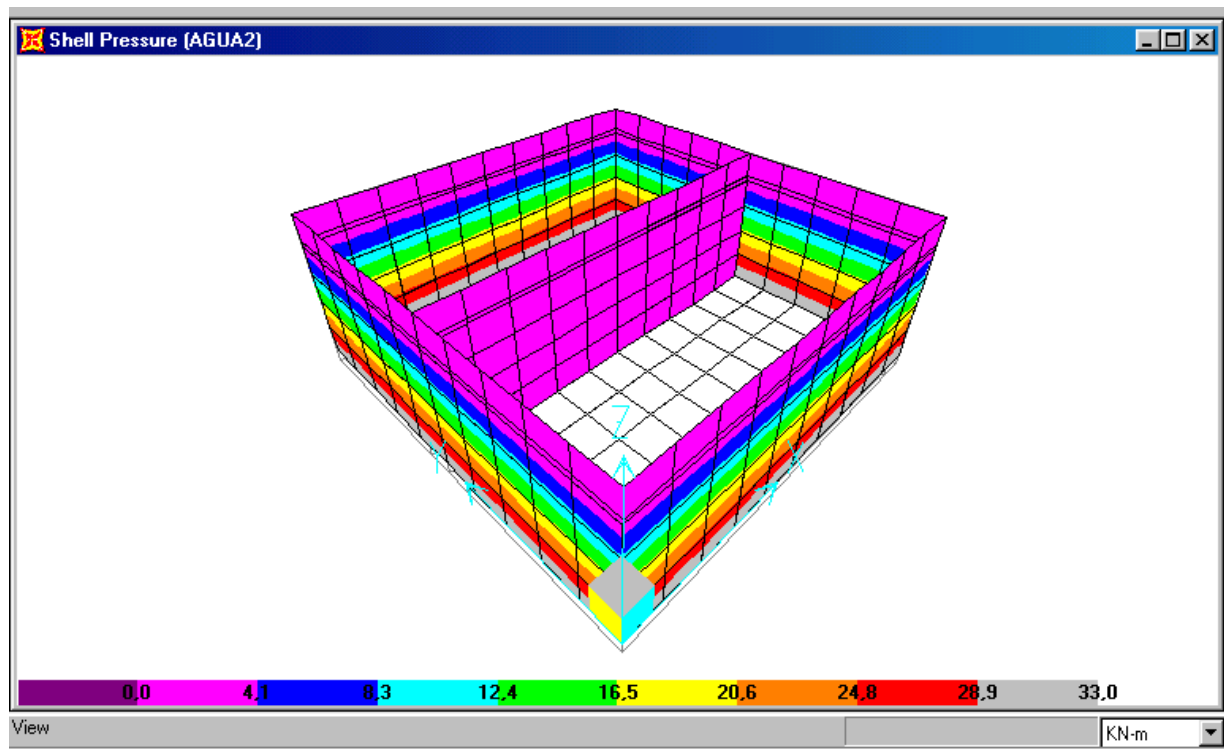
1ª Hipótese- Vazia



2ª Hipótese – Cheia de um lado e vazio de outro



3ª – Hipótese- Cheia



4.1 Definição dos Parâmetros das molas

O método simplificado analisado anteriormente não leva em conta qualquer parâmetro do solo, que pode ser de fundamental importância. O fundo da caixa d'água é o elemento ou peça da estrutura responsável por transmitir as cargas da estrutura para o terreno, e o terreno portanto transmite as reações para a caixa d'água. Essas reações são dependentes do tipo de solo, ou seja, para cada tipo de solo teríamos uma reação diferente em função das propriedades de cada tipo de solo.

Para isso, é necessário adotar-se um modelo no qual se determine a resposta do solo sobre a estrutura. Assim sendo, serão consideradas molas atuando no fundo da caixa d'água representando o terreno. Para a determinação das constantes dessas molas para a análise computacional no programa SAP2000, as propriedades do solo serão levadas em conta tais como o Módulo de deformação transversal do solo (G_s) e Coeficiente de Poisson do solo (ν_s).

As constantes de mola serão determinadas de acordo com Suresh C. Arya, Michael W.O'Neill, George Pincus [2]. Considerando-se o solo não estratificado e desprezando os efeitos das cargas dinâmicas temos:

1) Definições dos parâmetros da base

B =	10,40	m	Comprimento da base
L =	10,20	m	Largura da base
H =	3,97	m	Altura da base
E_c =	21.287,37	MPa	Módulo de elasticidade longitudinal do concreto segundo a NBR6118 para f_{ck} 20MPa
ν_c =	0,20	-----	Coeficiente de Poisson do concreto

2) Definição dos parâmetros geotécnicos

2.1) Base assente em argila dura

$G_s =$	290	MPa	Módulo de deformação transversal do solo
$\nu_s =$	0,3	-	Coefficiente de Poisson do solo
$\rho_s =$	1800	Kg /m ³	Massa específica do solo

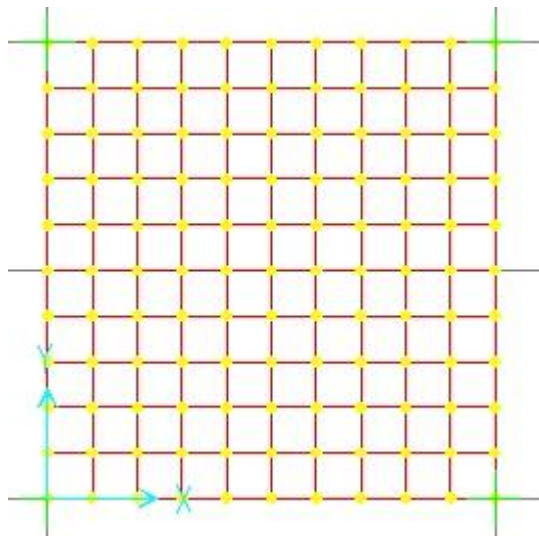
3) Coeficiente de mola vertical total da fundação (kz)

β_z	Razão de massa		
$L / B =$	0,98		
$\beta_z =$	2,00	(Ref [2] fig 4-1 em anexo)	
r_o	$r_o = ((0,8 H ((Ec / Gs) (1 - \nu_s)) / (1 - \nu_c^2))^{0,333}$		
	(Ref [2] eq 5-2 em anexo)		
$r_o =$	11,90	m	
η_z	Fator de correção dos coeficientes de mola		
$\eta_z = 1 + 0,6 (1 - \nu_s) (H / r_o)$	(Ref [2] tab 4-2 em anexo)		
$\eta_z =$	1,14		
k_z	Coeficiente de mola vertical total da fundação		
$k_z = (Gs \beta_z (B L)^{(1/2)} \eta_z) / (1 - \nu_s)$	(Ref [2] tab 4-1 em anexo)		
$k_z =$	9,73E+06	KN / m	

Para efeito de comparação, de acordo com o Sussekind [1], o coeficiente de recalque do solo para argila dura é $c = 10^5$ kN/m³. Considerando as dimensões da caixa 10,6 m x 10,4 m, o coeficiente de mola vertical será dado por $k_z = 10,6 \times 10,4 \times 10^5 = 11 \times 10^6$ kN/m. Este valor corresponde a mesma ordem de grandeza do valor obtido anteriormente segundo Suresh C. Arya, Michael W.O'Neill, George Pincus.

A base da caixa d'água modelada, foi refinada em 10 divisões verticais (11 nós) e 10 divisões horizontais (11 nós) num total de 100 elementos de casca e 121 nós na base. Desses 121 nós, 42 representam os pontos de extremidade e 79 representam os pontos de centro.

O coeficiente de mola vertical total da fundação (K_z), obtido em função da área total da base (BL), deveria ser distribuído de forma uniforme sobre a base que está sujeita as reações do terreno. Porém, no programa de elementos finitos utilizado as constantes de mola são determinadas nos nós.



Sabendo-se que a área de influencia dos pontos de centro é o dobro da área de influência dos pontos de extremidade, a divisão do Coeficiente de mola vertical total da fundação (K_z) foi feita da seguinte forma:

Para os nós na extremidade o valor total e K_z foi dividido por 2×79 (número de nós no centro, sabendo que essa área de influencia é o dobro do que nas extremidades) mais 49 (número de nós na extremidade, sabendo que a área de influencia é metade da área de influencia dos nos do centro).

Para os nós no centro foi feita a relação $2 \times K_z$ (o coeficiente de mola vertical do centro é o dobro do coeficiente de mola vertical da extremidade)

4) determinação do coeficiente de rigidez vertical para o modelo no programa SAP 2000.

4.1) Premissas de modelagem.

$kz_e = kz / (79 + 79 + 42)$	48.648,50	kN / m	Pontos de extremidade
$kz_c = 2 * kze$	97.296,99	kN / m	Pontos de centro

Verificação:

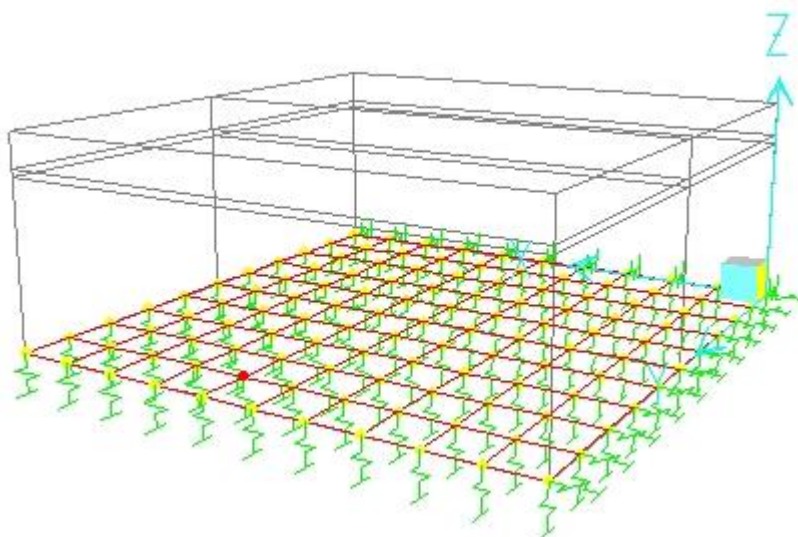
$42 * kze =$	2.043.236,80	kN / m
$79 * kzc =$	7.686.462,23	kN / m
$KzTotal =$	9.729.699,03	kN / m

5) Coeficiente de mola horizontal total da fundação (kx e ky)

$\beta_x = \beta_y$

$\beta_x = \beta_y$	Razão de massa	
$L / B =$	0,98	
$\beta_x = \beta_y =$	1,00	(Ref [2] fig 4-1 em anexo)
$\eta_x = \eta_y$	Fator de correção dos coeficientes de mola	
$\eta_x \square = \eta_y = 1 + 0,55 (2 - v_s) (h / r_o)$	(Ref [2] tab 4-2 em anexo)	
$\eta_x \square = \eta_y =$	1,31	
$k_x = k_y$	Coeficiente de mola horizontal total da fundação	
$k_x = k_y = 2 (1 + v_s \square \square) G_s \beta_x (B L)^{(1/2)} \eta_x$	(Ref [2] tab 4-1 em anexo)	
$k_x = k_y =$	1,02E+07	KN / m

Os coeficientes de mola horizontais totais da fundação também obtidos em função da área total da base (BL) foram distribuídos nos 11 nós de apenas um dos lados, (tanto para o lado paralelo ao eixo X quanto para o lado paralelo ao eixo Y) representando uma distribuição de forma uniforme sobre os lados que estão sujeitos as reações do terreno. No programa de elementos finitos utilizado, as constantes de mola são determinadas nos nós. Essas molas laterais tem a função de dar estabilidade a caixa, uma vez que não existe nenhum tipo de apoio lateral.



6) Determinação do coeficiente de rigidez horizontal para o modelo no programa SAP 2000

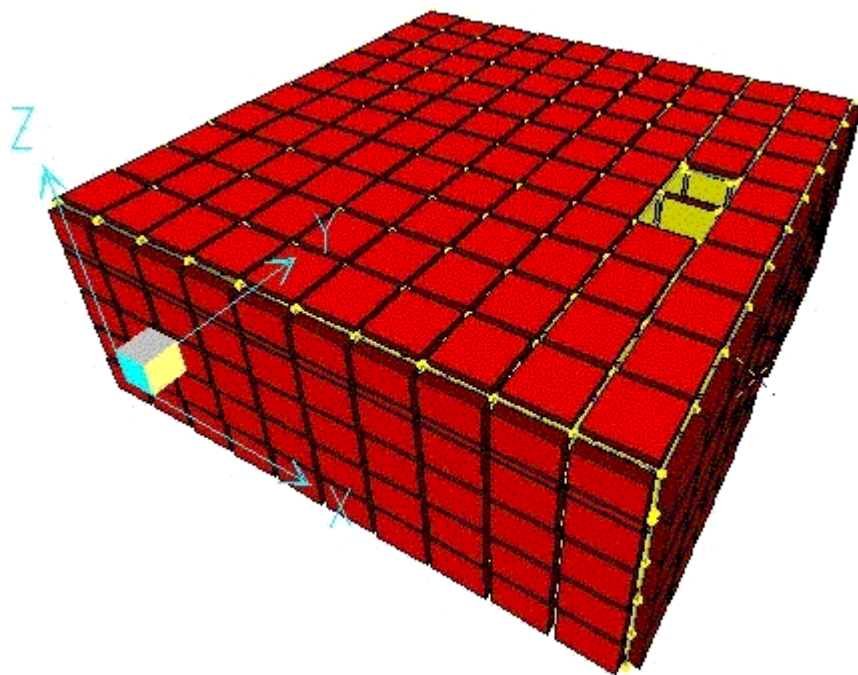
6.1) Premissas de modelagem.

Na direção x 11 pontos			
Na direção y 11 pontos			
$k_x = k_x/11$	926.214,27	kN / m	(EIXO 2)
$k_y = k_y/11$	926.214,27	kN / m	(EIXO 3)

4.2 Definição da abertura na tampa

O método simplificado, calculado anteriormente, também não leva em conta a abertura existente na tampa. Para isso foram modeladas no programa de elementos finitos aberturas na tampa mostrando assim as concentrações de tensões existentes nos arredores das aberturas o que não é possível determinar pelo no método simplificado.

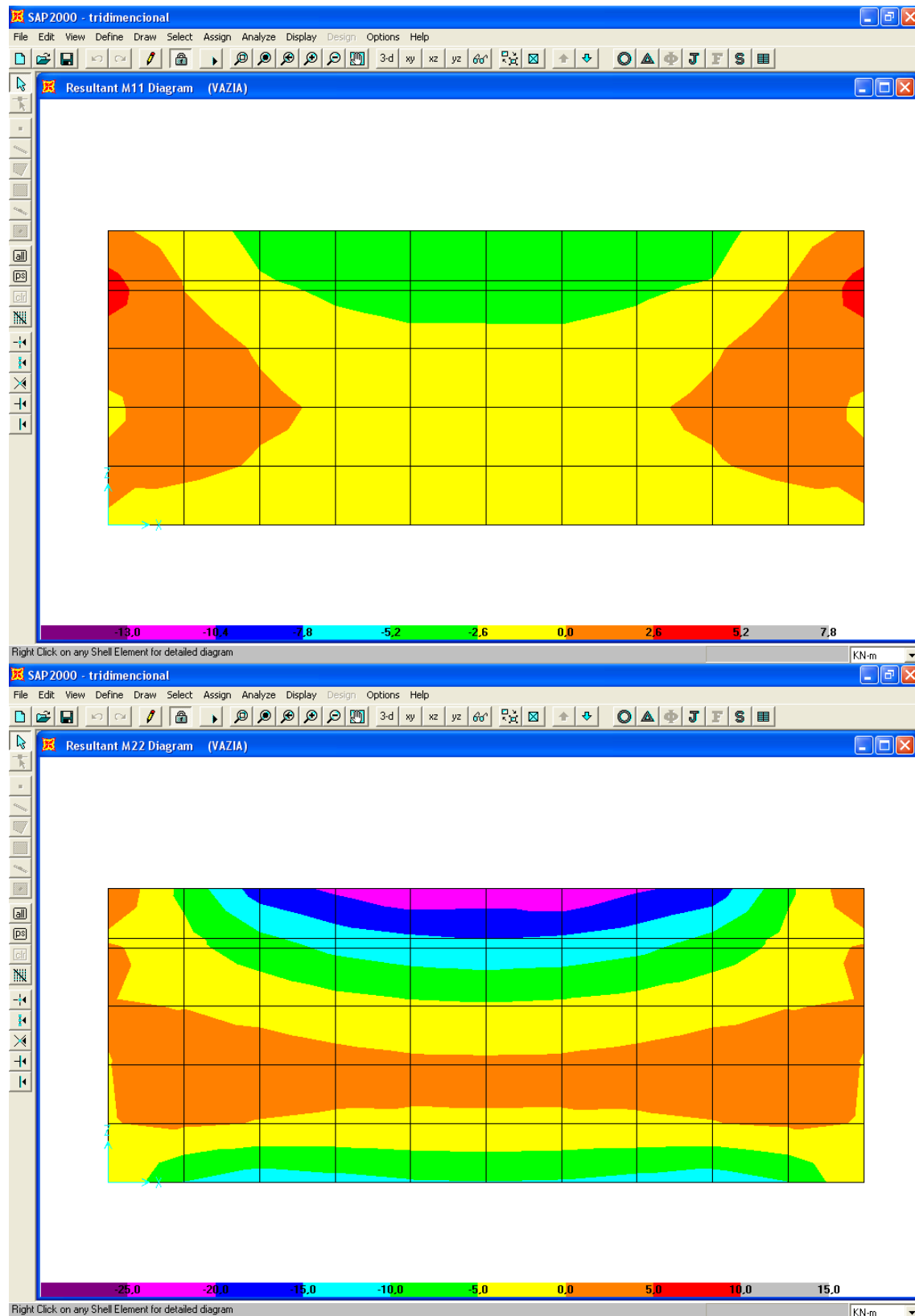
OBS: O refinamento da malha foi insuficiente para relatar as variações de tensões nos bordos das aberturas.



4.3 Resultados

4.3.1 Caixa d'água Vazia

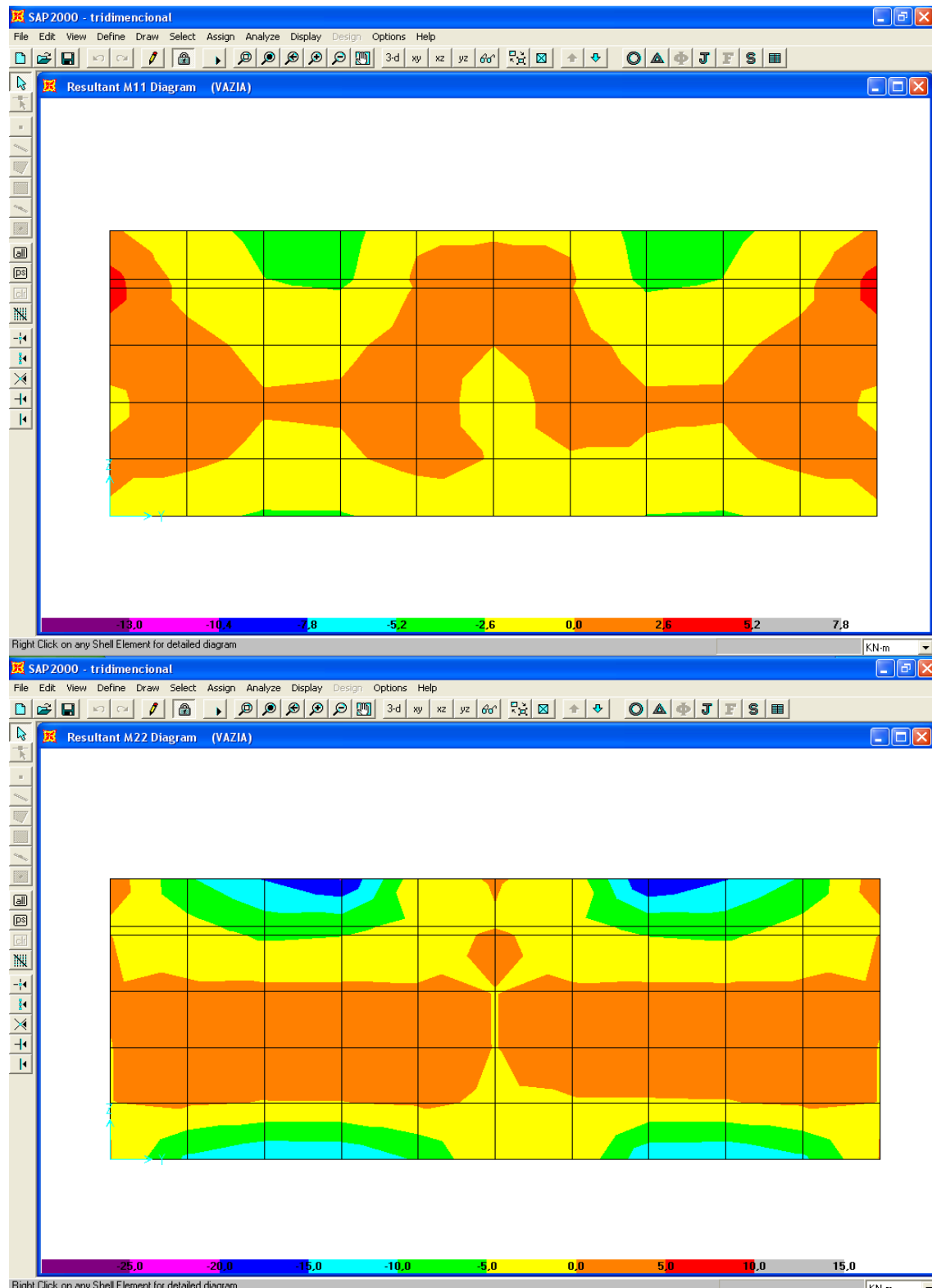
4.3.1.1 Parede XZ (Par 1 e Par 3)



4.3.1.2 Parede YZ (Par 4 e Par 5)

Vazia

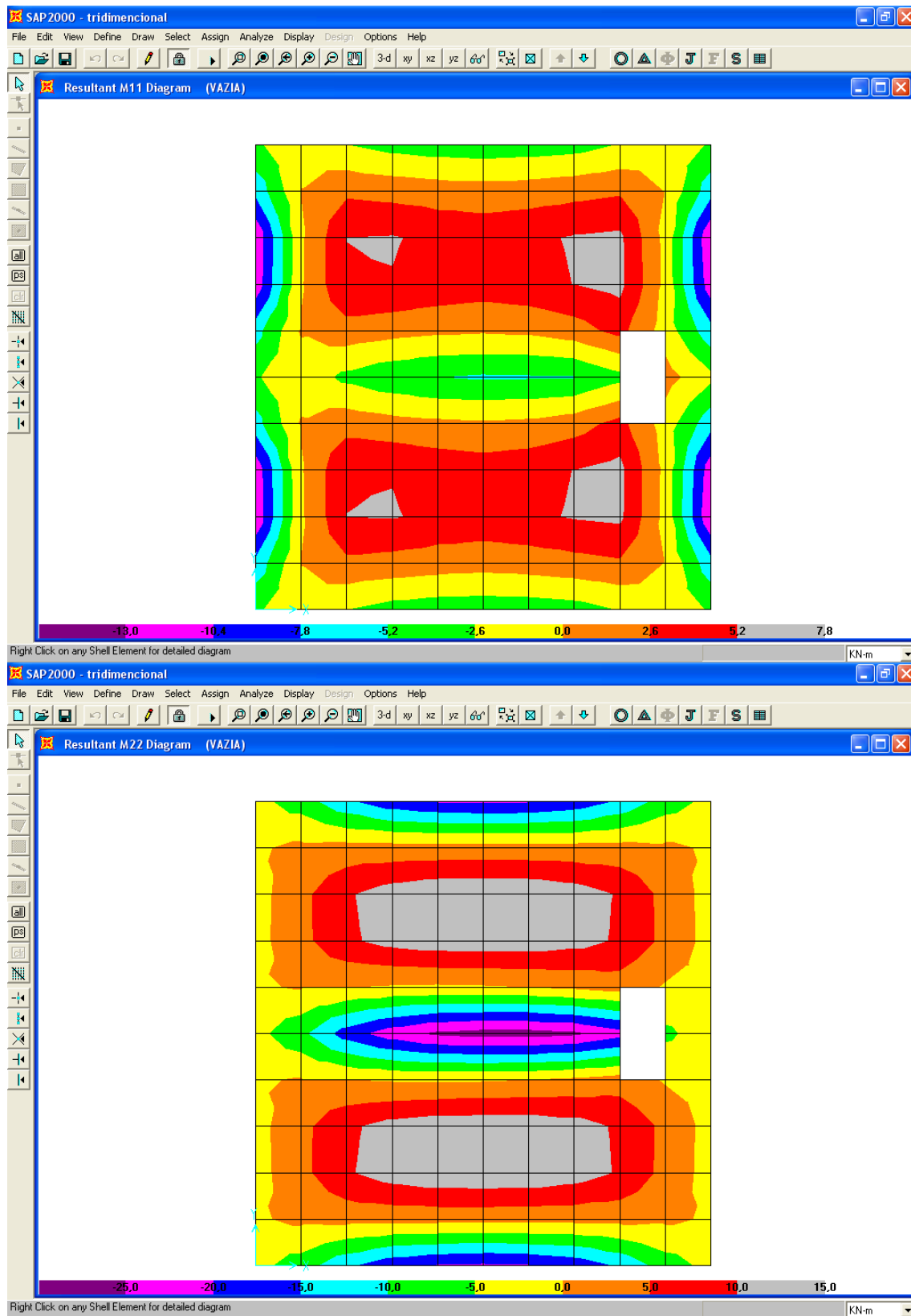
Parede YZ



4.3.1.3 Tampa

Vazia

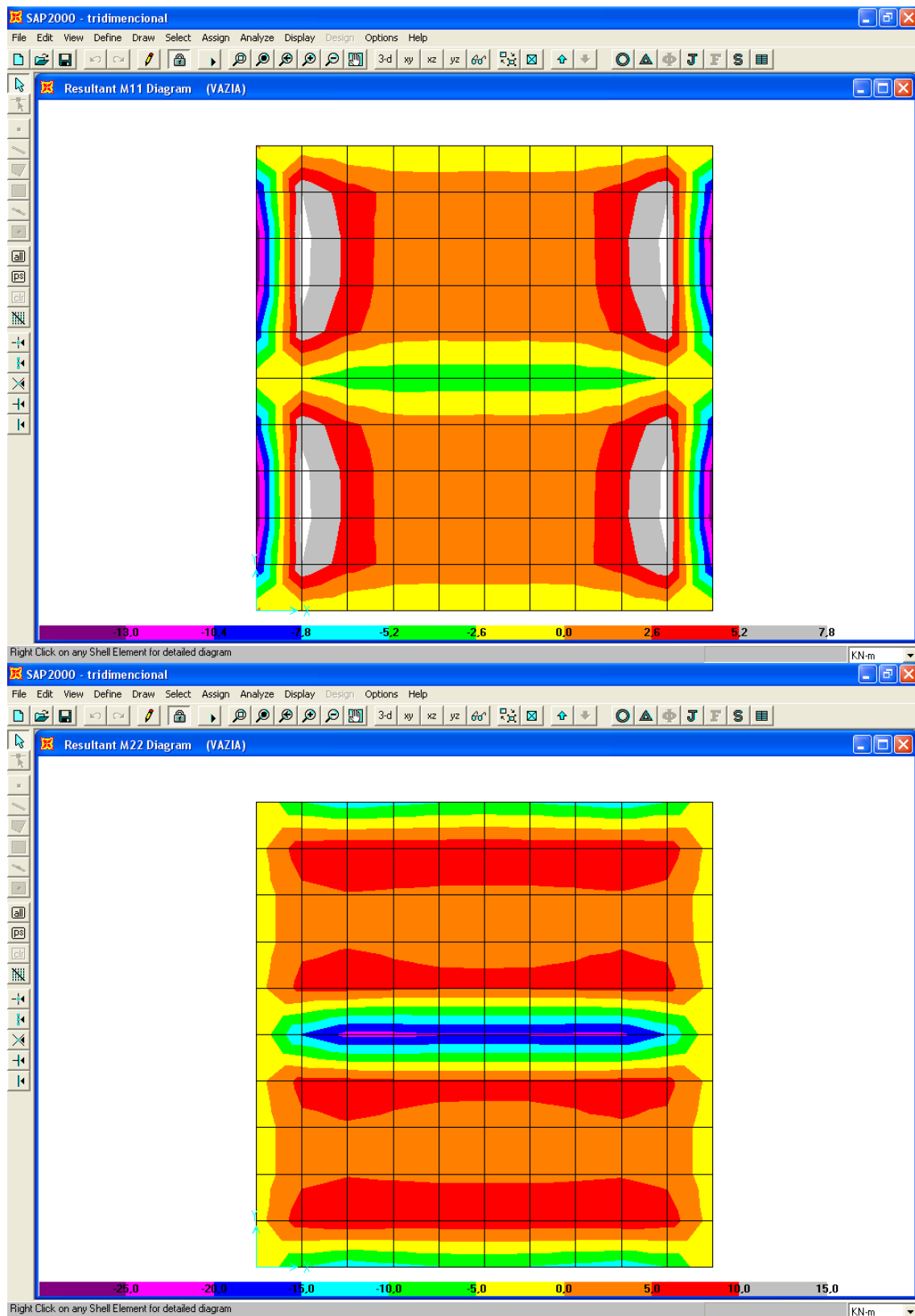
Tampa



4.3.1.4 Fundo

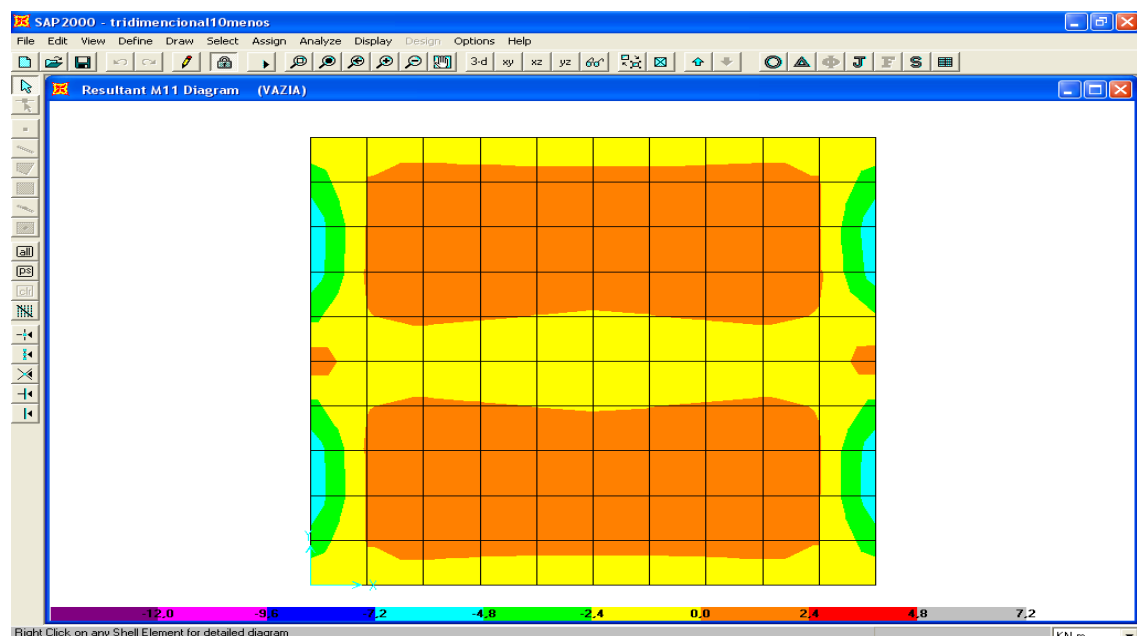
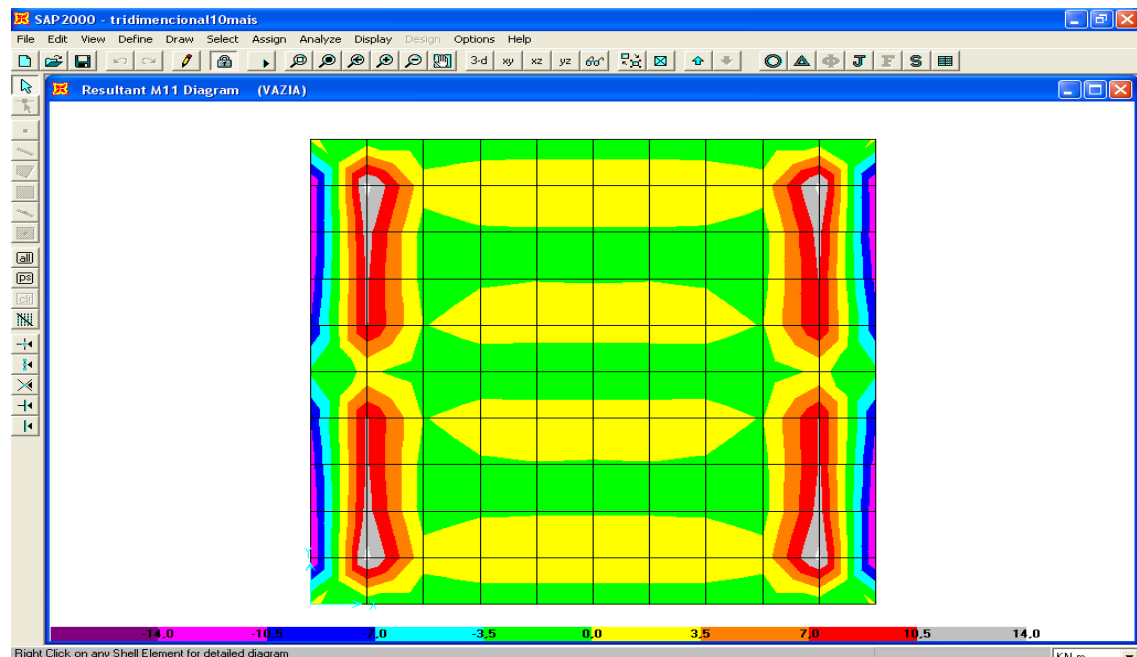
Vazia

Fundo

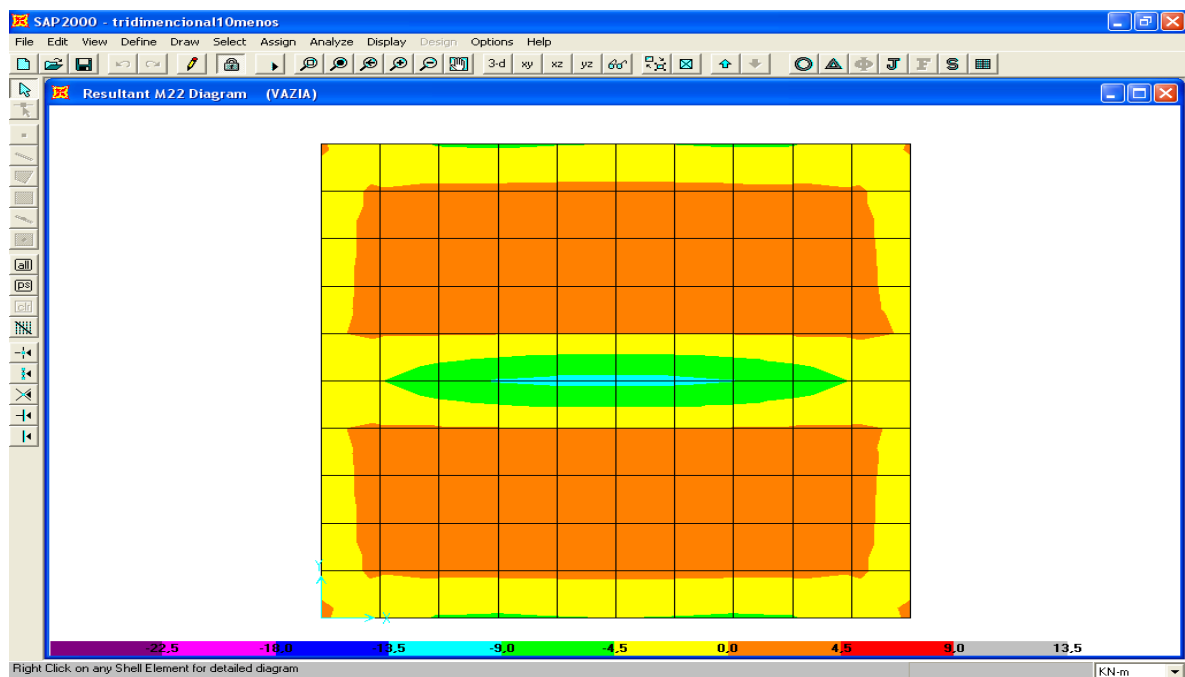
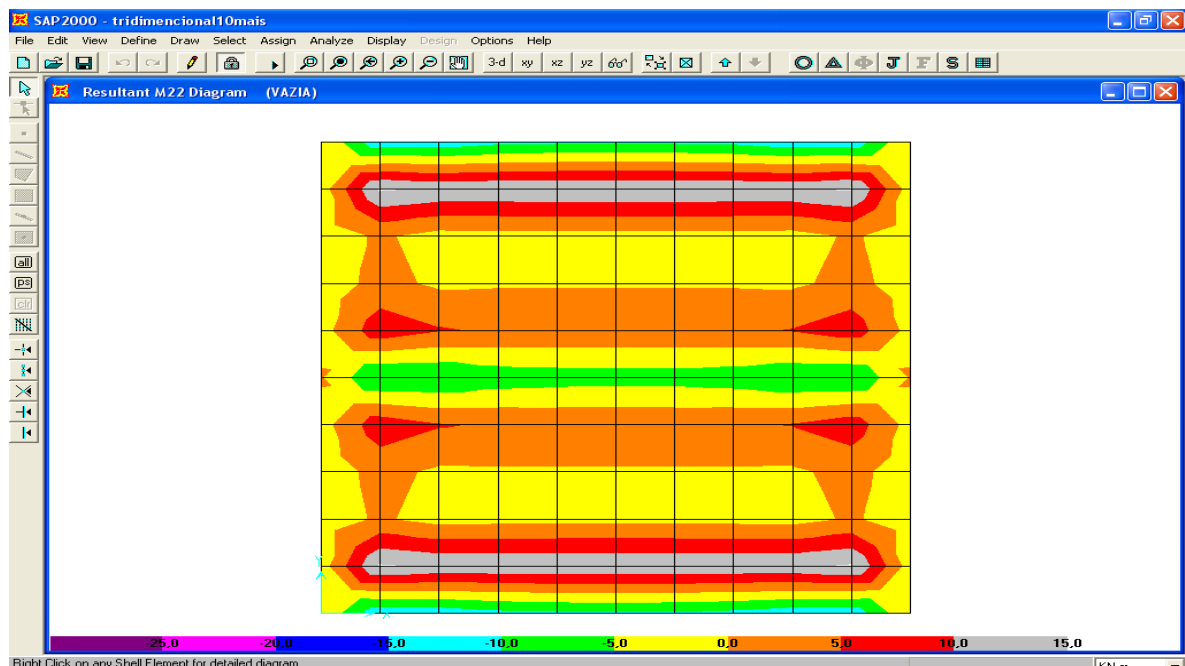


Aqui são apresentados os resultados da caixa d'água vazia com a variação dos coeficientes de mola variando de $K_z \times 10$ (multiplicado por 10) e $K_z/10$ (dividido por 10), respectivamente.

Variação com os coeficientes de molas verticais- M11



Variação com os coeficientes de molas verticais- M22



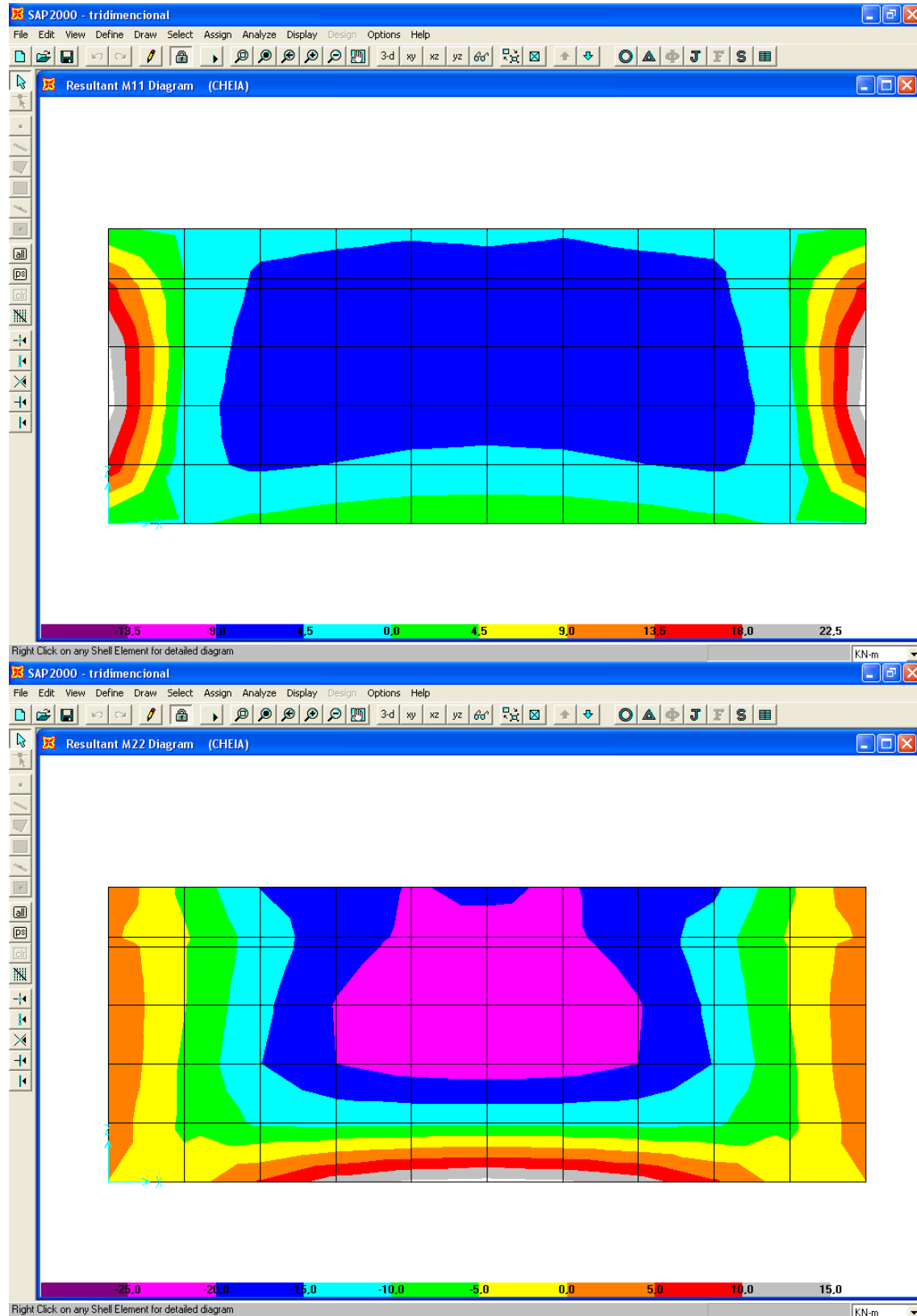
Pode-se notar, portanto que apesar das configurações das cores terem sido alterados as faixas dos momentos não foram muito alterados. Os momentos em todas essas análises foram bem inferiores aos calculados pelo método simplificado.

4.3.2 Caixa d'água Cheia

4.3.2.1 Parede XZ (Par 1 e Par 3)

Cheia

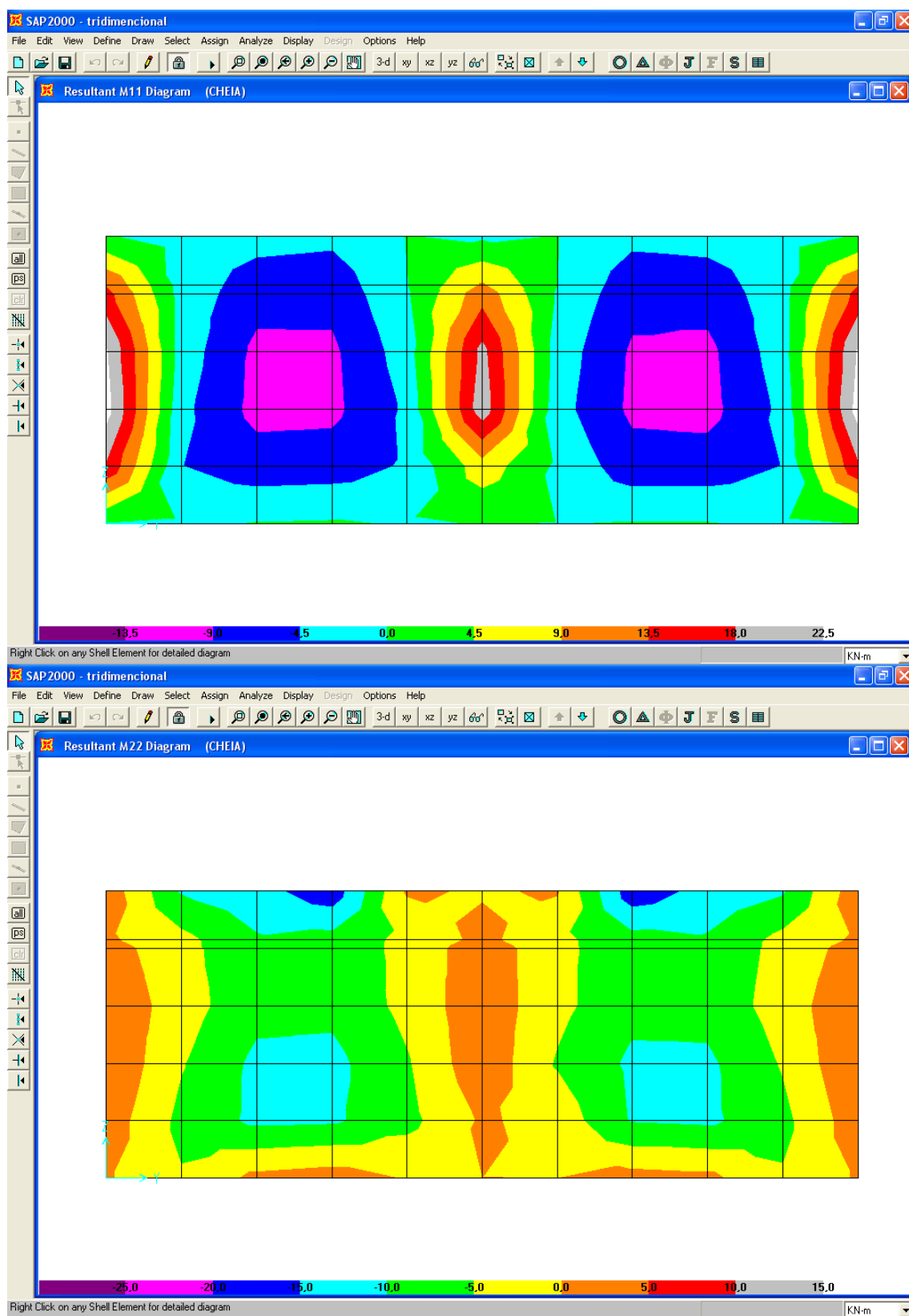
Parede XZ



4.3.2.2 Parede YZ (Par 4 e Par 5)

Cheia

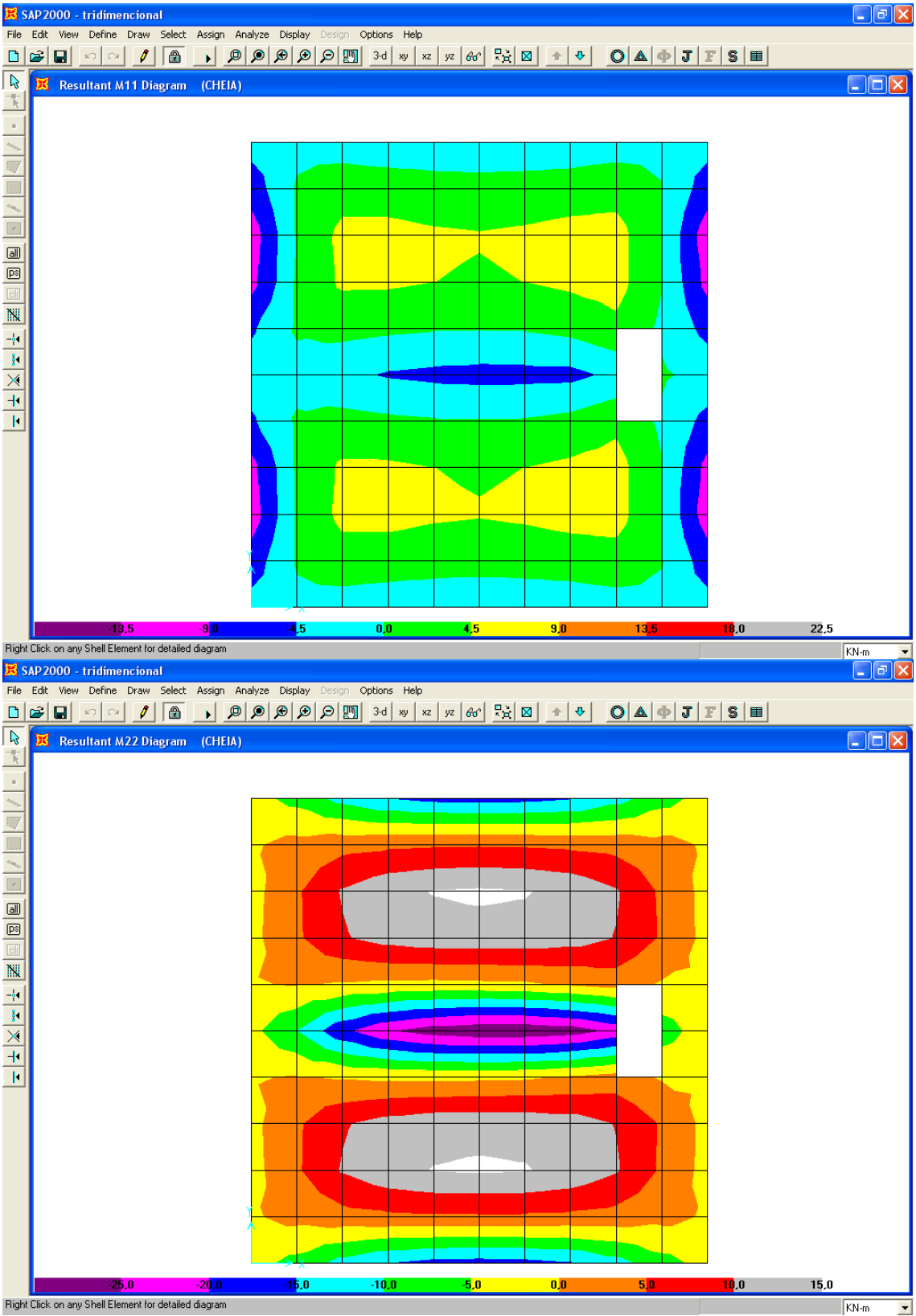
Parede YZ



4.3.2.3 Tampa

Cheia

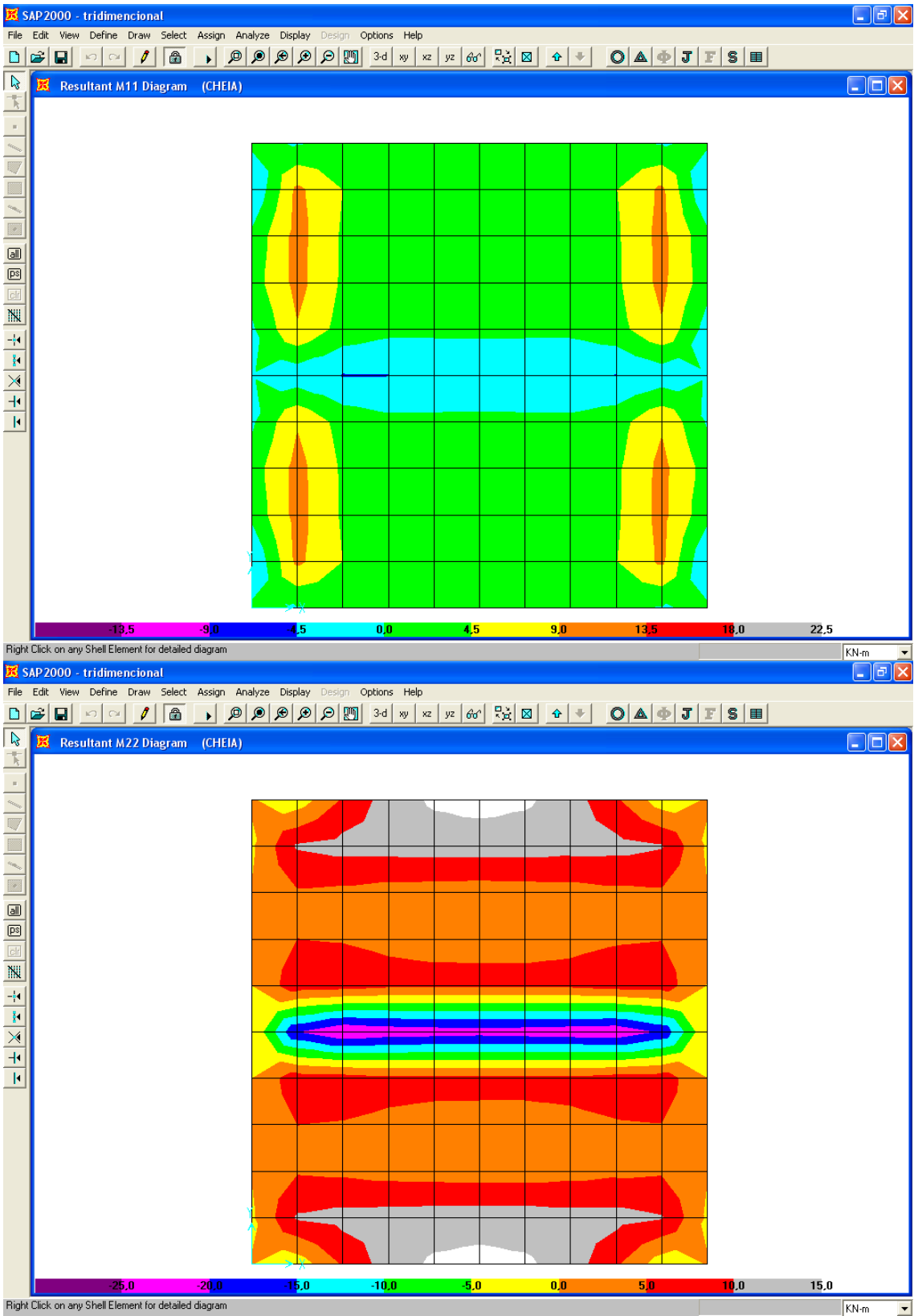
Tampa



4.3.2.4 Fundo

Cheia

Fundo



4.4 Tabelas de resultados

No método simplificado o trecho de ligação de uma parede com outra parede ou com a laje da tampa e do fundo, consideramos a media ou 0,8 do maior momento fletor. Já no cálculo tridimensional esses valores são obtidos diretamente, já que o calculo é feito de maneira global por Elementos Finitos, sem as simplificações das condições de apoio.

A seguir, estão mostrados os momentos a serem usados para o cálculo das armaduras (valores em negrito) obtidos pelos dois métodos :

Laje kN.m/m		Método simplificado		tridimensional kN.m/m	
		Vazia	Cheia	Vazia	Cheia
Par 1 e 3 dir X	X	6,86	28,61	2,60	22,50
	M	-	6,08	2,60	4,50
Par 1 e 3 dir Z	X (inf)	29,13	42,12	5,00	15,00
	X (sup)	12,27	16,94	25,00	20,00
	M (ext)		33,36	-	20,00
	M (int)	6,40		5,00	-
Par 4 e 5 dir Y	X	6,86	28,61	2,60	22,50
	M (ext)		8,32	-	9,00
	M (int)	2,02		2,60	-
Par 4 e 5 dir Z	X (inf)	19,98	-	10,00	5,00
	X (sup)	8,92	16,94	15,00	15,00
	M (ext)		11,70	-	10,00
	M (int)	4,51		5,00	-
Tampa dir X	X	8,92	-	13,00	9,00
	M	1,67	2,97	7,80	9,00
Tampa dir Y	X	12,27	16,94	25,00	25,00
	M	6,97	10,21	15,00	15,00
Fundo dir X	X	19,98	-	13,00	13,50
	M	4,62	7,39	7,80	4,50
Fundo dir Y	X	29,13	42,12	20,00	25,00
	M	17,34	25,41	10,00	10,00

A diferença entre os dois métodos se mostrou mais acentuada nas ligações com o fundo. A presença das molas reduziu significativamente os momentos neste (conforme exposto anteriormente), e essa redução dos momentos se espalhou pelas paredes que são ligadas ao fundo.

O Cálculo das seções de ferro foi feito a partir dos esforços determinados pelo Método simplificado. Na tabela seguir, estão mostrados os momentos, as seções de ferro e as armaduras adotadas.

Fórmulas Utilizadas

$k_{md} = \gamma_f \cdot M / b \cdot d^2 \cdot f_{cd} \rightarrow k_z$
$As = \gamma_f \cdot M / k_z \cdot d \cdot f_{yd}$
$As_{min} = 0,15\% \cdot b \cdot h$
$f_{cd} = 20000 / 1,4 = 14285,71 \text{ kN/m}^2$
$f_{yd} = 500000 / 1,15 = 434782,6 \text{ kN/m}^2$
$\gamma_f = 1,4$

ESTADO LIMITE ÚLTIMO - FLEXÃO

Caixa d'água enterrada

Laje		M kN.m	b m	h m	d m	fcd kN/m²	k _{md}	k _z	As ₁ cm²/m	As _{min} cm²	As Adotada
Par 1 e 3 dir X	X	28,61	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,087	0,946	5,4	3,0	φ 12,5 c/15
	M	6,08	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,018	0,989	1,1	3,0	φ 8 c/15
Par 1 e 3 dir Z	X (inf)	42,12	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,127	0,918	8,2	3,0	φ 12,5 c/15
	X (sup)	12,27	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,037	0,978	2,2	3,0	φ 8 c/15
	M (ext)	33,36	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,101	0,937	6,4	3,0	φ 10 c/10
	M (int)	6,40	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,019	0,988	1,2	3,0	φ 8 c/10
Par 2 dir X	X	28,61	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,087	0,946	5,4	3,0	φ 12,5 c/15
	M	6,08	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,018	0,989	1,1	3,0	φ 8 c/15
Par 2 dir Z	X (inf)	42,12	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,127	0,918	8,2	3,0	φ 12,5 c/15
	X (sup)	12,27	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,037	0,978	2,2	3,0	φ 8 c/15
	M (ext)	33,36	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,101	0,937	6,4	3,0	φ 10 c/10
	M (int)	33,36	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,101	0,937	6,4	3,0	φ 10 c/10
Par 4 e 5 dir Y	X	28,61	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,087	0,946	5,4	3,0	φ 12,5 c/15
	M (ext)	8,32	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,025	0,985	1,5	3,0	φ 10 c/15
	M (int)	2,02	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,006	0,996	0,4	3,0	φ 8 c/15
Par 4 e 5 dir Z	X (inf)	19,98	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,060	0,963	3,7	3,0	φ 12,5 c/15
	X (sup)	16,94	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,051	0,969	3,1	3,0	φ 8 c/15
	M (ext)	11,70	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,035	0,979	2,1	3,0	φ 10 c/15
	M (int)	4,51	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,014	0,992	0,8	3,0	φ 8 c/15
Tampa dir X	X	8,92	1,00	0,12	0,10	14285,71	0,087	0,946	3,0	1,8	φ 10 c/15
	M	2,97	1,00	0,12	0,10	14285,71	0,029	0,983	1,0	1,8	φ 6,3 c/15
Tampa dir Y	X	16,94	1,00	0,12	0,10	14285,71	0,166	0,890	6,1	1,8	φ 10 c/10
	M	10,21	1,00	0,12	0,10	14285,71	0,100	0,937	3,5	1,8	φ 8 c/12,5
Fundo dir X	X	19,976	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,060	0,963	3,7	3,0	φ 10 c/15
	M	7,39	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,022	0,987	1,3	3,0	φ 8 c/15
Fundo dir Y	X	42,12	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,127	0,918	8,2	3,0	φ 12,5 c/12,5
	M	25,41	1,00	0,20	0,18	14285,71	0,077	0,953	4,8	3,0	φ 10 c/12,5

5. Conclusão

Na análise estrutural de um determinado elemento, um dos passos mais importantes é a obtenção do valor das tensões atuantes. Atualmente, obtém-se estes dados de modo relativamente fácil através de métodos numérico de programas computacionais.

Os avanços na área de informática tornaram viável o emprego de diversos programas de Elementos Finitos. Portanto, a utilização de Elementos Finitos na análise da estrutura é de grande valia para uma maior precisão na determinação dos esforços atuantes e sua relação com a geometria. Além disso, o uso do Método dos Elementos Finitos apresenta ainda como vantagem a possibilidade de se fazer uma análise global da caixa d'água usando um modelo tridimensional. O Método simplificado analisa separadamente todos os elementos de placa, obtendo assim valores aproximados.

Porém, é necessário uma análise crítica dos resultados gerados pelos programas computacionais. Um simples erro nesse arquivo de entrada pode gerar prejuízos incalculáveis. Como exemplo, um erro, nas unidades poderá gerar um erro de 10^x vezes o valor do resultado esperado.

Por isso, uma análise feita por métodos aproximados se torna um procedimento fundamental, que certamente não fornece resultados precisos, mas dará uma noção da ordem de grandeza das variáveis envolvidas no problema.

Como foi exposto durante o trabalho, os resultados, obtidos na comparação do método simplificado com a modelagem de placas isoladas foi satisfatória. A tabela de comparação dos resultados mostrada no item (3.3) mostra isso.

A modelagem tridimensional, mostrou alguns aspectos interessantes principalmente na laje do fundo, onde os momentos ficaram menores do que no método simplificado devido a presença de molas por todo o fundo.

A análise da caixa d'água semi cheia não se fez necessário pois esforços submetidos nas paredes e no fundo desta são os mesmos, ou inferiores aos esforços obtidos com a caixa d'água cheia (considerando somente a pressão d'água) ou com a

caixa d'água vazia (considerando somente a pressão atuante do terreno sob a caixa d'água)

6. Anexos

6.1 Planta de forma Caixa d'água

6.2 Desenho de armação Caixa d'água

7. Referencias Bibliográficas

1. 'Curso de Análise Estrutural' Sussekind, J.C, Volume 2, Editora Globo, 1981
2. 'Design of Structure and Foundations for Vibrating Machines', Suresh Arya, Micheal O'Neill, George Pincus, Houston 1981
3. Norma Brasileira de Concreto NBR6118
4. 'Notas de aulas' Estruturas de Concreto Armado I e II, Longo, Henrique, Rio de Janeiro, UFRJ 2003
5. Tabelas de lajes
 - tabelas de Czerny
 - Beton Kaleder
 - 'Curso Prático de Concreto Armado', Aderson Moreira da Rocha, volume IV
6. Programa computacional SAP 2000

