

Modelos de cálculo dos reservatórios dos edifícios

Design models of water tanks in buildings

José Milton de Araújo

Escola de Engenharia - FURG - Rio Grande, RS

RESUMO: Neste trabalho, apresentam-se três métodos para cálculo dos esforços nos reservatórios de água potável dos edifícios. Através de exemplos numéricos, comparam-se as soluções obtidas com o processo simplificado tradicional, com o emprego do método das forças e através do método dos elementos finitos. A solução baseada no método dos elementos finitos é inédita. Com essa solução, pode-se utilizar um programa clássico para cálculo de placas para resolver a estrutura tridimensional dos reservatórios.

ABSTRACT: In this work, we present three methods for calculation of the efforts in water tanks of buildings. Through numeric examples, we compare the solutions obtained by means of the simplified process, by means of the force method and through finite element method. The solution based on the finite element method is unpublished. Using this solution, a classic program for plates analysis may be used for to calculate the three-dimensional structure of the water tanks.

1. INTRODUÇÃO

Usualmente, os reservatórios de água potável dos edifícios têm a forma de um prisma e são formados por um conjunto de placas, podendo ter uma ou mais células. Geralmente, são projetados dois reservatórios: um reservatório inferior e um reservatório superior.

Para evitar a contaminação da água de abastecimento do edifício, a NBR-5626⁽¹⁾ exige um afastamento mínimo de 60 cm entre as paredes do reservatório inferior e qualquer obstáculo lateral, bem como entre o fundo e o terreno. Quando esses reservatórios forem construídos dentro de um poço, este deve ser drenado continuamente.

Desse modo, não é permitido o uso de reservatórios enterrados para o armazenamento de água potável, como se fazia antigamente. Assim, os procedimentos de cálculo dos esforços nos dois tipos de reservatório são os mesmos, bastando considerar a hipótese de reservatório cheio, já que ele nunca estará em contato com o solo.

Quando o reservatório for destinado ao armazenamento de outro líquido, que não seja água potável, é possível projetar o reservatório enterrado. Nesses casos, devem-se considerar as hipóteses de reservatório cheio e de reservatório

vazio, para levar em conta o empuxo de solo. As considerações para o cálculo dos reservatórios enterrados podem ser encontradas nas referências [2,3], não sendo objeto deste artigo.

Por se tratar de uma estrutura espacial constituída por placas, o cálculo dos esforços nos reservatórios prismáticos é extremamente complexo. Uma vez que soluções analíticas exatas são inexistentes, deve-se recorrer a métodos numéricos ou a métodos simplificados.

Soluções numéricas muito precisas podem ser obtidas com o Método dos Elementos Finitos (MEF), empregando-se elementos de casca. Alternativamente, pode-se empregar o elemento isoparamétrico quadrático de oito nós, baseado na teoria de placas de Mindlin, o qual se encontra descrito na ref. [4]. Neste caso, deve-se acrescentar uma rotação de corpo rígido θ_z do plano da placa, para permitir a associação das placas contidas em planos diferentes. Desse modo, o elemento fica com seis graus de liberdade por nó: três deslocamentos e três rotações.

Como alternativa a essas duas opções de emprego do MEF, apresenta-se neste artigo uma solução inédita do problema, na qual o elemento de placa original é utilizado para a análise de reservatórios prismáticos. Nessa solução, o reservatório é analisado como um piso constituído

por três lajes. A continuidade das rotações nas arestas comuns a duas paredes é garantida com o emprego de uma função de penalidade.

Os reservatórios prismáticos também podem ser analisados pelo método das forças. Neste caso, admite-se que os momentos nas ligações entre as diversas lajes tenham uma variação senoidal ao longo das arestas comuns. Uma parte da solução é analítica e outra parte é obtida por meio de série dupla de Fourier. Teoricamente, o método converge para a solução exata com a convergência da série de Fourier. O erro existente consiste na consideração de uma variação senoidal dos momentos de ligação entre as lajes do reservatório.

Tanto o MEF, quanto o método das forças, exigem o emprego de um programa de computador.

Para a realização de um cálculo manual, pode-se empregar o método simplificado descrito na ref. [5]. Neste caso, os esforços são obtidos com o emprego de tabelas para cálculo de placas.

O objetivo deste artigo é fazer uma comparação dos resultados obtidos com esses três métodos de cálculo.

2. CARGAS NOS RESERVATÓRIOS

As lajes que compõem o reservatório estão submetidas a cargas perpendiculares ao seu plano médio, bem como a cargas atuando no próprio plano da laje. Tem-se, desse modo, um funcionamento simultâneo como placa (para as cargas normais ao plano da laje) e como viga ou viga-parede (para as cargas aplicadas no plano da laje).

Na fig. 1, indicam-se as cargas perpendiculares ao plano médio das lajes em um corte vertical.

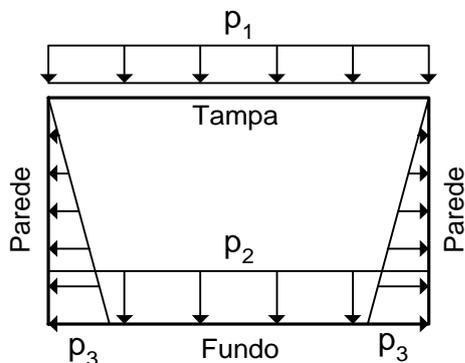


Fig. 1 - Cargas para funcionamento como placas

A laje da tampa está submetida a uma carga uniforme p_1 , composta pelo peso próprio, pelo

revestimento e por uma sobrecarga mínima. No fundo atua a carga uniforme p_2 , composta pelo peso próprio, pelo revestimento e pela pressão hidrostática. As paredes estão submetidas a uma carga triangular, cuja ordenada máxima p_3 é igual à pressão hidrostática. Exemplos numéricos estão disponíveis na ref. [5].

Do cálculo como placas, obtêm-se os momentos fletores nos diversos pontos das lajes do reservatório, bem como suas reações de apoio. Uma vez que cada laje se apoia nas lajes vizinhas, suas reações de apoio são transmitidas às lajes vizinhas como cargas aplicadas no plano médio das mesmas. Desse modo, as lajes estarão submetidas à flexo-tração.

As reações de apoio não são uniformemente distribuídas, porém, os esforços normais de tração tendem a se uniformizar em direção ao centro das lajes. Desse modo, pode-se considerar que as cargas aplicadas no plano das lajes são uniformes.

As lajes da tampa e do fundo estão submetidas à flexo-tração. As paredes também estão sob flexo-tração, devendo-se ainda realizar um dimensionamento como viga-parede, ou viga esbelta, se for o caso. Os detalhes da composição desse carregamento podem ser obtidos na ref. [5].

3. O MÉTODO SIMPLIFICADO

Neste artigo, considera-se o método simplificado para cálculo dos esforços solicitantes nos reservatórios (momentos fletores e esforços normais) descrito em detalhes na ref. [5]. Nesse método, é feita a separação das lajes que compõem o reservatório em diversas lajes isoladas, engastadas ou simplesmente apoiadas em suas bordas. Essas condições de contorno são definidas em função da tendência de giro relativo das diversas placas.

Na fig. 2, encontram-se representadas as diferentes lajes com suas condições de contorno.

Os momentos fletores e as reações de apoio das lajes do reservatório podem ser obtidos com o emprego das tabelas do Anexo 2 da ref. [6]. Para a tampa e o fundo, empregam-se as tabelas A2.1 e A2.6, respectivamente. Os momentos fletores nas paredes são obtidos com a tabela A2.17, considerando a carga triangular. Como essa tabela não fornece as reações de apoio, pode-se considerar a carga média $p = p_3/2$ e usar a tabela

A2.5, para o cálculo das reações de apoio das paredes.

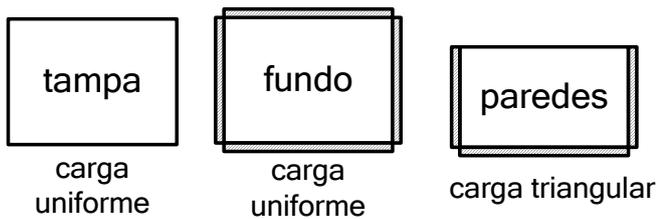


Fig. 2 - Condições de contorno das lajes

Os momentos fletores positivos obtidos para a tampa já são os valores finais, uma vez que a tampa é considerada simplesmente apoiada sobre as paredes. Porém, nas arestas comuns a duas paredes ou a uma parede e o fundo, resultam dois valores distintos para os momentos negativos. Como uma simplificação, considera-se que o valor correto desse momento negativo seja igual ao valor médio encontrado para as placas isoladas.

Na fig. 3, são indicados os momentos fletores positivos e negativos obtidos considerando-se as lajes isoladas, para um reservatório de uma célula. Nessa figura, as paredes são representadas no plano horizontal, juntamente com a laje de fundo. A tampa não é representada, já que o seu cálculo como laje isolada é definitivo.

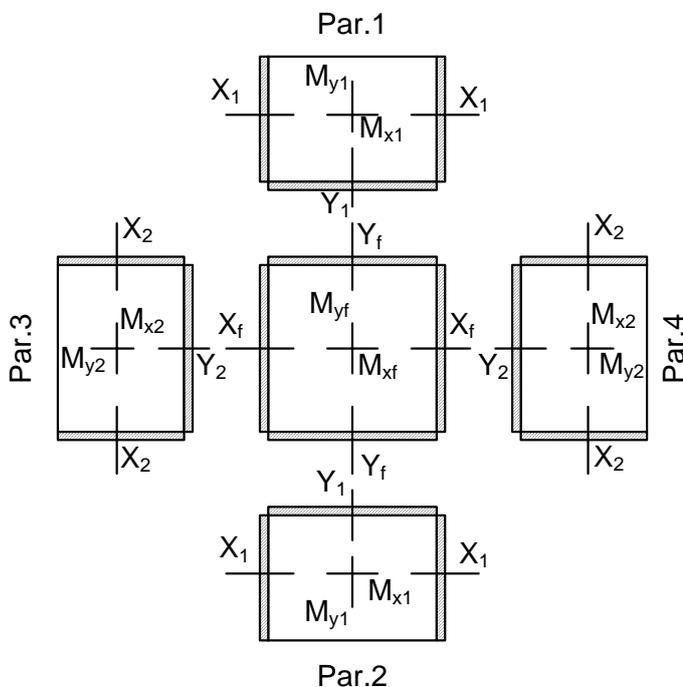


Fig. 3 - Momentos fletores resultantes do cálculo das lajes isoladas

No método simplificado, os momentos negativos para o dimensionamento das armaduras

de ligação das lajes são considerados com os seguintes valores:

$$\text{- ligação parede-parede: } X_p = (X_1 + X_2)/2$$

$$\text{- ligação fundo-parede 1 e fundo-parede 2: } Y = (Y_f + Y_1)/2$$

$$\text{- ligação fundo-parede 3 e fundo-parede 4: } X = (X_f + Y_2)/2$$

Em reservatórios de pequena altura, as paredes são calculadas como lajes armadas na direção vertical. Os momentos negativos Y_1 e Y_2 nas paredes são muito menores que os momentos Y_f e X_f no fundo. Nesses casos, deve-se garantir que $Y \geq 0,8Y_f$ e $X \geq 0,8X_f$ nas ligações fundo-paredes.

Em virtude da alteração dos momentos negativos, deve-se fazer uma correção nos valores dos momentos positivos no centro das placas. Em geral, os momentos negativos X e Y , adotados para as ligações do fundo com as paredes, são menores, em valores absolutos, do que os momentos X_f e Y_f obtidos no cálculo do fundo como laje isolada. Desse modo, os momentos positivos na laje de fundo serão maiores do que aqueles obtidos inicialmente, devendo-se fazer as devidas correções. Nas paredes ocorre uma redução dos momentos positivos e, a favor da segurança, não é feita a correção dos mesmos.

Para corrigir os momentos positivos na laje de fundo, deve-se aplicar em cada borda da mesma um momento igual à diferença entre o momento de engastamento perfeito e o momento final adotado. Assim, deve-se analisar novamente a laje de fundo sob a ação dos momentos $\Delta X = X_f - X$ e $\Delta Y = Y_f - Y$ aplicados em suas bordas. Com esse carregamento, obtêm-se os acréscimos de momentos fletores ΔM_x e ΔM_y no centro da laje de fundo, havendo tabela disponível na ref. [5]. Finalmente, calculam-se os momentos $M_x = M_{xf} + \Delta M_x$ e $M_y = M_{yf} + \Delta M_y$ no centro da laje de fundo.

4. CÁLCULO DE RESERVATÓRIOS COM O EMPREGO DO MEF

Ao empregar o Método dos Elementos Finitos (MEF) com a formulação proposta neste artigo, basta analisar um quarto do reservatório, já que o mesmo apresenta dupla simetria, como está indicado na fig. 4.

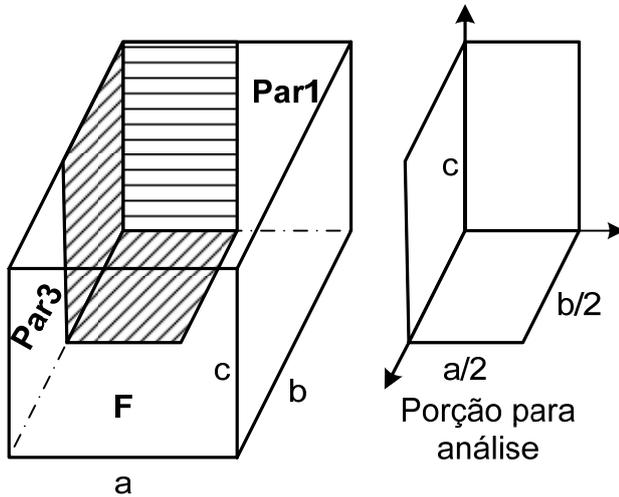


Fig. 4 – Aproveitamento da dupla simetria para a análise pelo método dos elementos finitos

A porção a ser analisada com o MEF é composta pela metade das paredes Par1 e Par3 e pela quarta parte da laje de fundo. A tampa é excluída, já que ela pode ser calculada separadamente como uma laje simplesmente apoiada no contorno. A laje de fundo possui vãos de cálculo a e b e as paredes têm uma altura igual a c .

Os esforços no reservatório podem ser obtidos com o emprego de um programa para análise de placas. Neste estudo, emprega-se um programa desenvolvido com base na teoria de placas de Mindlin, como descrito no capítulo 3 da ref. [6].

Projetando as porções das paredes Par1 e Par2 no plano horizontal, obtém-se a estrutura indicada na fig. 5, a qual é idêntica a um piso formado por três lajes.

Na formulação do elemento de placa consideram-se cinco graus de liberdade por nó: o deslocamento u , segundo a direção x , o deslocamento v , segundo a direção y , o deslocamento transversal w e as rotações θ_x e θ_y indicadas na fig. 5.

Nas arestas correspondentes à união das paredes com a tampa e nas ligações com a laje de fundo, consideram-se as condições de contorno típicas de

apoios simples: $w=0$ e rotação nula em torno de um eixo perpendicular ao lado. No eixo de simetria $y=0$, as condições de contorno são $v=0$ e $\theta_x=0$. No eixo de simetria $x=c+a/2$, as condições de contorno são $u=0$ e $\theta_y=0$, como indicado na fig. 5.

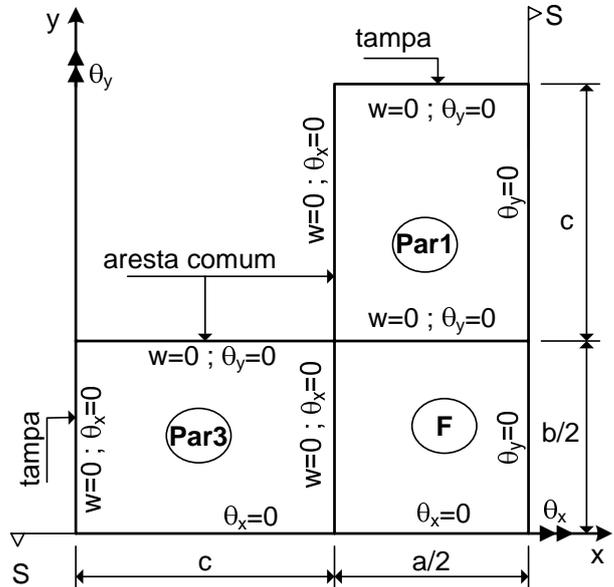


Fig. 5 – Lajes projetadas no plano horizontal

Na aresta comum às paredes Par1 e Par3 tem-se $w=0$ e $\theta_x=0$, para a parede Par1 (lado com $x=c$ e $y \geq b/2$), e $w=0$ e $\theta_y=0$, para a parede Par3 (lado com $x \leq c$ e $y = b/2$). Além disso, é necessário estabelecer a continuidade das rotações nessa aresta comum, como é indicado na fig. 6.

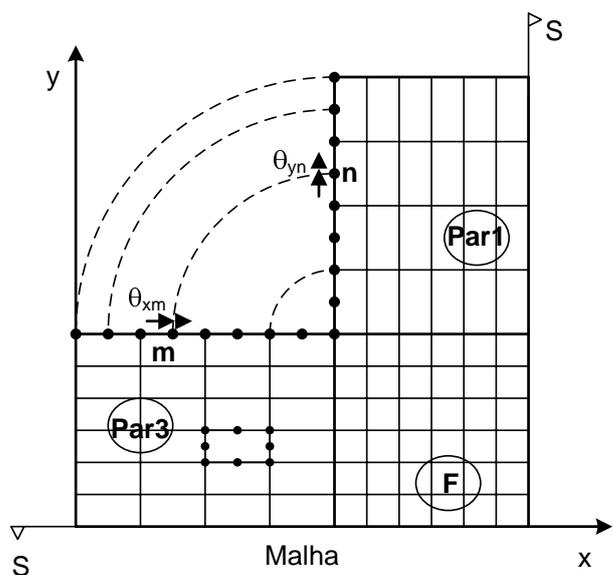


Fig. 6 – Continuidade da rotação na aresta comum

Para manter a continuidade, a rotação θ_{xm} do nó m deve ser igual à rotação θ_{yn} do nó n. O mesmo deve ser feito para todos os nós que se correspondem nessa aresta comum. Essa condição de contorno pode ser introduzida através da denominada função de penalidade⁽⁷⁾.

Suponha que a rotação θ_{xm} corresponda ao grau de liberdade i , no sistema global de equações de equilíbrio, e que θ_{yn} corresponda ao grau de liberdade j . Introduzindo a função de penalidade $f = \alpha(\theta_{xm} - \theta_{yn})^2$ no funcional da energia potencial e minimizando, verifica-se que é necessário alterar os elementos K_{ii} , K_{ij} e K_{jj} da matriz de rigidez global. Os novos elementos da matriz passam a ser

$$\bar{K}_{ii} = K_{ii} + 2\alpha; \quad \bar{K}_{ij} = K_{ij} - 2\alpha; \quad \bar{K}_{jj} = K_{jj} + 2\alpha \quad (1)$$

onde α é um número muito grande.

Experiência numérica com o método indicou que se pode adotar $\alpha = 10^9 K_{\max}$, onde K_{\max} é o maior elemento da diagonal da matriz de rigidez global da estrutura.

Deve-se observar que, quando a matriz de rigidez é armazenada em um arranjo retangular, a largura mínima de banda deve ser igual a $5(D_{\max} + 1)$, onde D_{\max} é a maior diferença entre os números dos nós que se correspondem na aresta comum. Assim, a banda é calculada da forma usual, mas deve-se respeitar esse valor mínimo para que o elemento \bar{K}_{ij} esteja presente no arranjo retangular.

A grande vantagem do procedimento apresentado é que se pode empregar um programa para análise de placas com um mínimo de alteração. Alternativamente, pode-se incluir uma rotação de corpo rígido do elemento finito no plano x-y, passando-se para seis graus de liberdade por nó. Entretanto, esse procedimento requer uma ampla e complexa modificação do programa já desenvolvido para análise de placas.

Na fig. 7 indicam-se as cargas atuantes nas três lajes do piso fictício que representa a porção analisada do reservatório. A ordenada da carga triangular que atua nas paredes é calculada no centro de cada elemento finito. A carga em cada elemento é considerada uniformemente distribuída

com esse valor obtido para o seu centro. O mesmo programa gerador de malha é utilizado para determinar o carregamento nos elementos finitos.

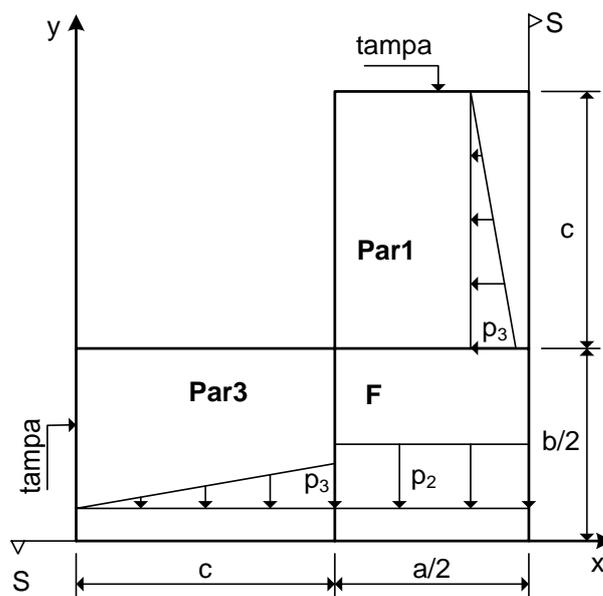


Fig. 7 – Carregamento nas lajes

5. CÁLCULO DE RESERVATÓRIOS PELO MÉTODO DAS FORÇAS

O cálculo dos esforços solicitantes nos reservatórios prismáticos também pode ser feito através do método das forças. Inicialmente, consideram-se as paredes e a laje de fundo como placas simplesmente apoiadas, submetidas às cargas perpendiculares ao seu plano médio.

Na fig. 8, representam-se as quatro paredes, projetadas no plano horizontal, juntamente com a laje de fundo. Para simplificar a análise, considera-se que as paredes são submetidas a uma carga uniformemente distribuída com o valor médio $p = p_3/2$.

Nas uniões entre as paredes, atua o momento fletor de ligação, cujo valor máximo X_p ocorre no meio da aresta comum (aresta 1-1 da fig. 8). Nas ligações das paredes 1 e 2 com o fundo, o valor máximo do momento é Y_f (aresta 1-2). Nas ligações das paredes 3 e 4 com o fundo, o valor máximo do momento fletor de ligação é X_f (aresta 1-3). Admite-se que esses três momentos possuam variação senoidal ao longo da aresta comum. Os seus valores máximos são as incógnitas do problema, ou seja, são os hiperestáticos.

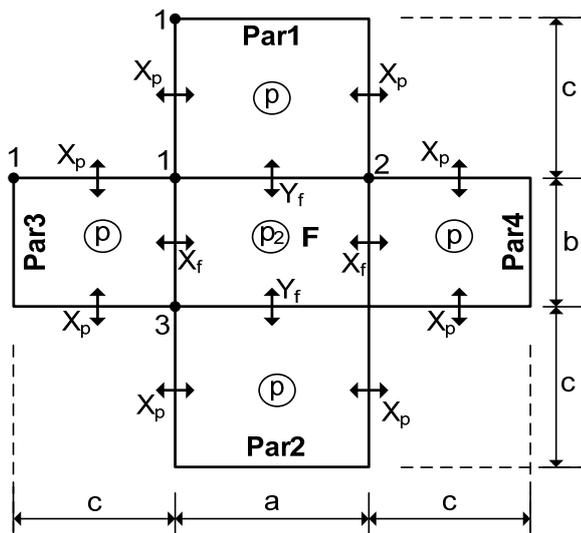


Fig. 8 – Lajes rotuladas nas arestas comuns

Para encontrar os hiperestáticos, devem-se aplicar as equações de compatibilidade das rotações nas três arestas típicas. As rotações no meio da aresta comum são obtidas superpondo as rotações devidas à carga uniforme com as rotações devidas aos hiperestáticos.

Para ilustrar o procedimento, considera-se a compatibilidade de rotação na aresta 1-1, na ligação entre a parede 1 e a parede 3.

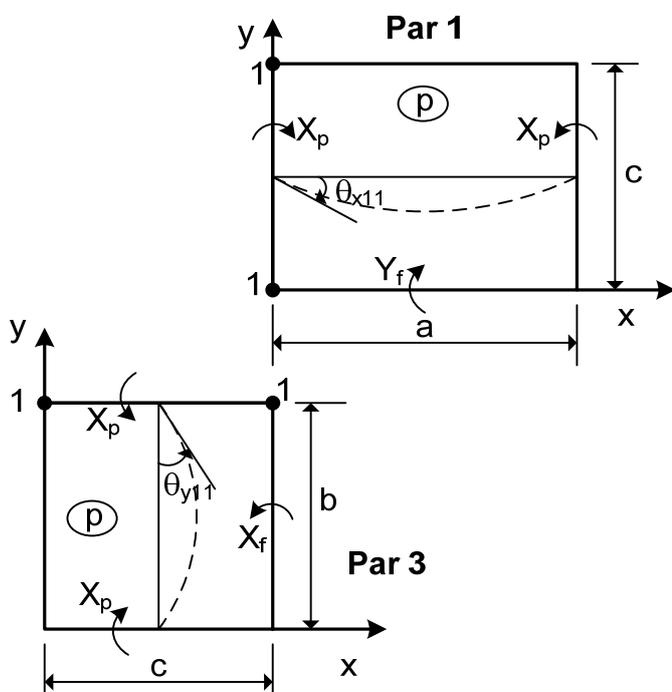


Fig. 9 – Rotações na aresta 1-1

A rotação θ_{x11} no centro da aresta 1-1 da parede 1, é dada por

$$\theta_{x11} = \theta_x(p) + A_1 X_p + A_2 Y_f \quad (2)$$

onde $\theta_x(p)$ é a rotação devida à carga uniformemente distribuída $p = p_3/2$, A_1 é a rotação devida à aplicação dos momentos unitários $X_p = 1$ nas duas bordas de comprimento c e A_2 é a rotação devida ao momento unitário $Y_f = 1$.

A rotação θ_{y11} no centro da aresta 1-1 da parede 3, é dada por

$$\theta_{y11} = \theta_y(p) + B_1 X_p + B_2 X_f \quad (3)$$

onde $\theta_y(p)$ é a rotação devida à carga uniformemente distribuída $p = p_3/2$, B_1 é a rotação devida à aplicação dos momentos unitários $X_p = 1$ nas duas bordas de comprimento c e B_2 é a rotação devida ao momento unitário $X_f = 1$.

As componentes das rotações θ_{x11} e θ_{y11} são facilmente determinadas a partir das soluções $w(x, y)$ para placas retangulares simplesmente apoiadas nas quatro bordas.

A função $w(x, y)$ correspondente à carga uniforme é obtida por meio da solução de Navier, como apresentado na ref. [6].

A solução $w(x, y)$ da equação diferencial da placa simplesmente apoiada, submetida a um momento senoidal em uma das bordas, pode ser obtida analiticamente, como é apresentado na ref. [8].

Para garantir a compatibilidade da rotação na aresta 1-1, deve-se escrever

$$\theta_{x11} = \theta_{y11} \quad (4)$$

Substituindo (2) e (3) na equação (4), pode-se escrever

$$S_{11} X_p + S_{12} X_f + S_{13} Y_f = Q_1 \quad (5)$$

Aplicando o mesmo procedimento para as arestas 1-2 e 1-3, chega-se ao sistema de três equações a três incógnitas

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_p \\ X_f \\ Y_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Resolvendo esse sistema de equações, obtêm-se os hiperestáticos, que são os momentos de ligação entre as lajes do reservatório.

Após a obtenção dos hiperestáticos, podem-se determinar os momentos fletores no centro das paredes e do fundo por superposição de efeitos. Novamente, empregam-se as soluções $w(x, y)$ para a placa retangular simplesmente apoiada com carga uniforme e com momento senoidal em uma das bordas. Os momentos fletores M_x e M_y no centro das placas são obtidos a partir das segundas derivadas de $w(x, y)$, com as relações apresentadas em [6,8].

Observa-se que, no método das forças, os momentos negativos de ligação entre as lajes são aqueles que garantem a continuidade das rotações nas arestas comuns. No processo simplificado, esses momentos são considerados iguais à média dos momentos de engastamento perfeito das duas lajes vizinhas, não sendo garantida a continuidade das rotações.

Por outro lado, no método das forças, os momentos positivos no centro de todas as lajes são calculados corretamente, após a solução do problema hiperestático. No processo simplificado, só é feita a correção dos momentos positivos na laje de fundo.

As únicas simplificações atribuídas ao método das forças são a consideração de variação senoidal dos momentos de ligação ao longo das arestas comuns e a garantia de continuidade das rotações apenas no centro dessas arestas. Entretanto, como será mostrado a seguir, essas hipóteses simplificadoras são perfeitamente compatíveis com a solução obtida através do MEF.

6. RESULTADOS

6.1 - Reservatório exemplo da ref. [5]

Na fig. 10 indicam-se os momentos fletores obtidos para o reservatório do exemplo de cálculo apresentado no capítulo 5 da ref. [5]. Nessa figura, é feita a comparação entre os resultados obtidos com o MEF e os resultados do cálculo

simplificado. Os valores entre parêntesis foram obtidos através do processo simplificado.

Conforme se observa, os resultados obtidos com o processo simplificado concordam razoavelmente bem com o MEF. Em geral, o método simplificado fica a favor da segurança. As eventuais discrepâncias nos resultados são cobertas pela armadura mínima.

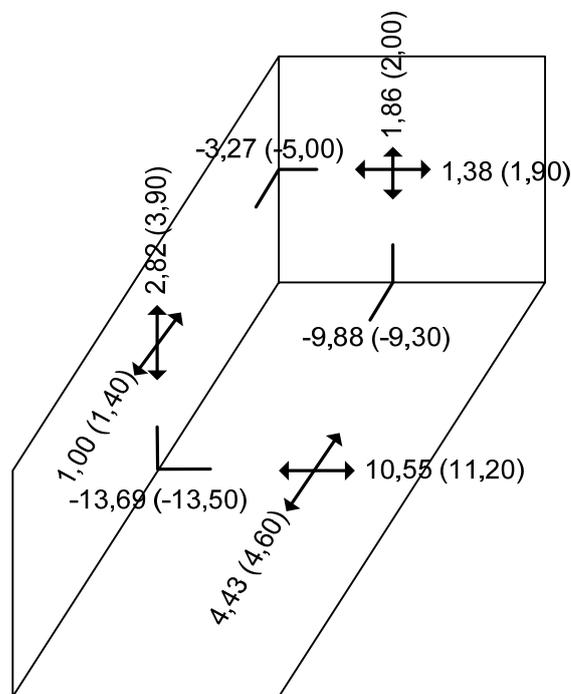


Fig. 10 – Momentos fletores: MEF versus processo simplificado

Na fig. 11, comparam-se os resultados obtidos com o MEF e através do método das forças. Os valores entre parêntesis foram obtidos através do método das forças.

Como se observa, os resultados obtidos com os dois métodos são muito próximos. Comparando os resultados das figuras 10 e 11, verifica-se que o método das forças se aproxima mais do MEF do que o método simplificado. Isto é particularmente verdadeiro para os momentos fletores nas paredes, já que esses momentos não sofrem correções no método simplificado.

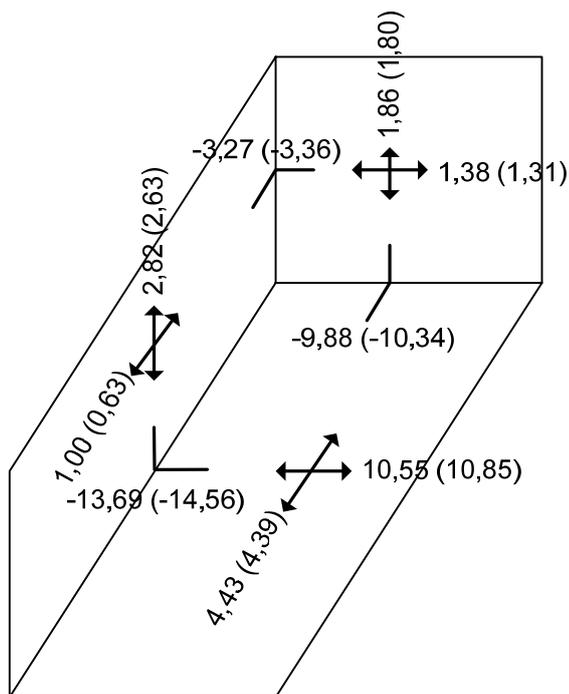


Fig. 11 – Momentos fletores: MEF versus método das forças

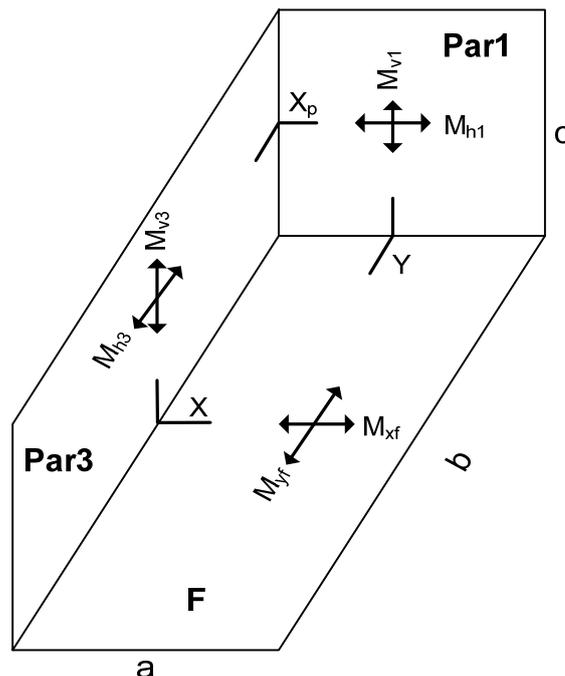


Fig. 12 – Momentos fletores no reservatório

6.2 – Outros exemplos de reservatórios

Nos exemplos apresentados a seguir, consideram-se as cargas $p_2 = p_3 = 10c \text{ kN/m}^2$, onde c é a altura das paredes do reservatório. As dimensões consideradas para os reservatórios dos exemplos são dadas na tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões dos reservatórios

Caso	a (m)	b (m)	c (m)
1	2	2	2
2	2	4	2
3	2	2	4
4	4	4	1

Os momentos fletores máximos positivos e os momentos negativos nas ligações são indicados na fig. 12.

Nas tabelas seguintes, os métodos de cálculo são designados por:

- 1: método dos elementos finitos;
- 2: método as forças;
- 3: método simplificado.

Resultados para o caso 1:

Tabela 2 – Momentos em kNm/m (caso 1)

Local Momentos	Método		
	1	2	3
Fundo			
M_{xf}	1,89	1,96	2,01
M_{yf}	1,89	1,96	2,01
Parede P1			
M_{h1}	0,90	0,91	0,98
M_{v1}	0,88	0,84	0,85
Parede P3			
M_{h3}	0,90	0,91	0,98
M_{v3}	0,88	0,84	0,85
Ligação P1-F			
Y	-3,29	-3,29	-3,42
Ligação P3-F			
X	-3,29	-3,29	-3,42
Ligação P1-P3			
X_p	-1,99	-2,09	-2,26

Resultados para o caso 2:

Tabela 3 – Momentos em kNm/m (caso 2)

Local Momentos	Método		
	1	2	3
Fundo			
Mxf	3,72	3,91	3,87
Myf	1,37	1,16	1,19
Parede P1			
Mh1	0,84	0,82	0,98
Mv1	0,82	0,76	0,85
Parede P3			
Mh3	0,68	0,59	0,75
Mv3	1,88	1,90	2,08
Ligação P1-F			
Y	-3,48	-3,65	-3,62
Ligação P3-F			
X	-5,65	-6,05	-5,79
Ligação P1-P3			
Xp	-2,08	-2,26	-2,58

Resultados para o caso 3:

Tabela 4 – Momentos em kNm/m (caso 3)

Local Momentos	Método		
	1	2	3
Fundo			
Mxf	3,54	3,93	3,60
Myf	3,54	3,93	3,60
Parede P1			
Mh1	3,76	3,38	3,30
Mv1	2,04	0,86	0,93
Parede P3			
Mh3	3,76	3,38	3,30
Mv3	2,04	0,86	0,93
Ligação P1-F			
Y	-6,76	-6,58	-7,70
Ligação P3-F			
X	-6,76	-6,58	-7,70
Ligação P1-P3			
Xp	-7,56	-7,02	-6,61

Para os casos 1, 2 e 3, o momento negativo em uma ligação, obtido através do processo simplificado, é igual à média dos dois valores calculados para as lajes isoladas. Observa-se que, nos três casos, o processo simplificado fornece resultados satisfatórios. As pequenas diferenças existentes entre os resultados do cálculo simplificado e os obtidos com o MEF não têm maior importância.

Resultados para o caso 4:

Neste caso, as paredes são lajes armadas na vertical (relações entre os vãos $a/c > 2$ e $b/c > 2$). No processo simplificado, os momentos nas paredes são calculados apenas segundo a vertical, como para uma viga engastada na base e rotulada no topo.

Entretanto, os momentos negativos na base das paredes são muito menores do que os momentos negativos obtidos para a laje de fundo, como uma laje quadrada engastada nos quatro lados. Devido a essa grande diferença de valores, a média não representa o melhor valor para o momento negativo nas ligações paredes-fundo. Neste caso, deve-se considerar 80% do momento negativo da laje de fundo, obtido como laje isolada.

Os resultados são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Momentos em kNm/m (caso 4)

Local Momentos	Método		
	1	2	3
Fundo			
Mxf	4,11	4,09	4,16
Myf	4,11	4,09	4,16
Parede P1			
Mh1	-0,64	-0,62	0,00
Mv1	-2,49	-2,10	0,17
Parede P3			
Mh3	-0,64	-0,62	0,00
Mv3	-2,49	-2,10	0,17
Ligação P1-F			
Y	-6,02	-6,24	-6,54
Ligação P3-F			
X	-6,02	-6,24	-6,54
Ligação P1-P3			
Xp	0,83	1,06	0,00

Da tabela 5 observa-se que a região central das paredes fica tracionada por dentro, enquanto na ligação entre as paredes o momento é positivo. Essa inversão no sentido dos momentos fletores nas paredes é decorrente da interação com a laje de fundo. Esse comportamento não pode ser previsto pelo cálculo simplificado. Neste caso, o uso de armadura dupla simétrica nas paredes cobre os erros de avaliação dos momentos fletores através do processo simplificado.

Observa-se que, no cálculo simplificado não são obtidos momentos horizontais nas paredes. A armadura mínima corrige esse erro.

7. CONCLUSÕES

O MEF, apesar de ser uma referência para a avaliação dos esforços solicitantes, requer um grande esforço computacional. A malha tem que ser bem refinada para permitir uma avaliação precisa dos momentos de ligação entre as lajes. Aliado a isto, há a complexidade natural do programa de elementos finitos.

O método das forças é de fácil implementação computacional, resultando um programa relativamente pequeno. O tempo de processamento é insignificante. Apesar da introdução da hipótese de variação senoidal dos momentos de ligação, os resultados são excelentes, quando comparados com o MEF. Desse modo, esse método se torna atrativo para a programação. Porém, ele não é adequado para a realização de cálculo manual.

O método simplificado é o único método compatível com o cálculo manual. Os resultados desse método também são satisfatórios para o projeto dos reservatórios de concreto armado. Os eventuais erros de cálculo são cobertos pelas armaduras mínimas, pela adoção de armaduras simétricas nas paredes e pelo coeficiente parcial de segurança relativo à pressão hidrostática.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR-5626: Instalação Predial de Água Fria*. Rio de Janeiro, 1998.
2. ROCHA, A. M. *Curso Prático de Concreto Armado*. v. 3, 18. ed., São Paulo: Livraria Nobel S. A., 1983.
3. SOUZA, V. C. M.; CUNHA, A. J. P. *Lajes em Concreto Armado e Protendido*. Niterói: EDUFF, 1994.
4. REAL, M. V. *Análise Estática de Lajes de Concreto Armado Incluindo Não-Linearidade Física e Geométrica*. Diss. Mestr., PPGEC, UFRGS, 1990.
5. ARAÚJO, J. M. *Curso de Concreto Armado*. v.4. Rio Grande: Editora Dunas, 2. ed., 2003 (obra completa em 4 volumes).
6. ARAÚJO, J. M. *Curso de Concreto Armado*. v.2. Rio Grande: Editora Dunas, 2. ed., 2003 (obra completa em 4 volumes).
7. ZIENKIEWICZ, O. C. *The Finite Element Method*. 3. ed., McGraw-Hill, 1977.

8. SZILARD, R. *Theory and Analysis of Plates: classical and numerical methods*. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1974.