

Análise de uma fundação do tipo radier para equipamentos portuários

Charlei Marcelo Paliga¹ & Mauro de Vasconcellos Real²

¹ *Doutorando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - UFRGS, Porto Alegre, RS – charleip@yahoo.com.br*

²Departamento de Materiais e Construção – FURG, Rio Grande, RS – mauro@dmc.furg.br

RESUMO: O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento de uma fundação do tipo radier de concreto armado apoiado diretamente no solo (base elástica) sob a ação de cargas devidas a um guindaste portuário fixo, empregando o método dos elementos finitos. O concreto é modelado através de elementos finitos isoparamétricos quadráticos de oito nós. O modelo constitutivo do concreto é bidimensional, e inclui o comportamento não-linear do material e a fissuração. A armadura é considerada como uma camada mais rígida dentro do elemento de concreto, que apenas resiste a esforços axiais na direção das barras. Através do Princípio dos Trabalhos Virtuais é incluída uma base elástica contínua sob todo o elemento, para representar o solo. É apresentado um estudo de caso de fundação para guindaste portuário fixo, na forma de radier de concreto armado.

PALAVRAS-CHAVE: Elementos finitos, concreto armado, lajes, base elástica, pavimento

1. INTRODUÇÃO

Na área portuária, tem-se a presença de cargas (normalmente concentradas) de grande intensidade, atuando usualmente sobre solos de baixa capacidade de carga. Quando as cargas são fixas, ou quando há a presença de equipamentos que trabalham sobre trilhos, como guindastes de pórtico, por exemplo, pode-se adotar uma solução em estacas. Porém, quando as cargas são móveis, ou seja, quando há ações variáveis normais provenientes de veículos, composições ferroviárias, equipamentos móveis, rodas, esteiras ou pneus, a solução adotada deverá ser em pavimento em placa de concreto, ou, dependendo da intensidade das cargas, em pavimento em placa de concreto armado.

Às vezes, é interessante adotar-se uma solução para melhorar as propriedades do solo no qual a placa será assentada. Uma solução é a estabilização do solo com uma mistura de cinza de carvão mineral mais cal, a qual torna o projeto em pavimento em placa de concreto mais econômico.

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento de lajes de concreto armado apoiadas diretamente no solo, sob a ação de cargas distribuídas e concentradas, devidas a equipamentos portuários, empregando o método dos elementos finitos. O concreto é modelado através de elementos finitos isoparamétricos quadráticos de oito nós. O modelo constitutivo do concreto é bidimensional, e inclui o comportamento não-linear do material e a fissuração. A armadura é considerada como uma camada mais rígida dentro do elemento de concreto, que apenas resiste a esforços axiais na direção das barras. Através do Princípio dos Trabalhos Virtuais é

incluída uma base elástica contínua sob todo o elemento, para representar o solo. O modelo foi testado comparando-se seus resultados com aqueles obtidos por outros autores. É apresentado um estudo de caso de pavimento onde foram testadas várias variáveis como espessura da placa, resistência à compressão do concreto, taxa de armadura e o módulo de reação do solo.

Entre os trabalhos clássicos nesta área, podem ser citados os de Timoshenko [16], Hetenyi [7] e Bowles [3]. Entre as publicações mais recentes tem-se Real [14], Liew et al. [10], Eratill e Aköz [6], Silva [15] e Vitoreti [18].

2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Seja a placa representada na Figura 1, através de seu plano médio, apoiada sobre uma base elástica, e que se encontra submetida a um carregamento formado pelas forças por unidade de superfície p_x , p_y e p_z atuando respectivamente nas direções x, y e z .

O método dos elementos finitos (M.E.F.) consiste em dividir-se o plano médio da placa em elementos de superfície (elementos finitos), que estão conectados entre si por meio de pontos nodais. Na solução em deslocamentos, as incógnitas do problema são os deslocamentos dos pontos nodais; sendo as tensões no interior do elemento e as reações de apoio calculadas a partir destes.

Na Figura 1 é mostrada uma possível discretização da placa em elementos finitos. Neste trabalho serão empregados elementos isoparamétricos quadráticos, de oito nós, da família Serendipity, cuja geometria se encontra descrita na Figura 2. Como sistema de referência local do elemento é adotado um sistema de coordenadas curvilíneas ξ e η . Os pontos nodais se encontram numerados de 1 a 8 ref[12].

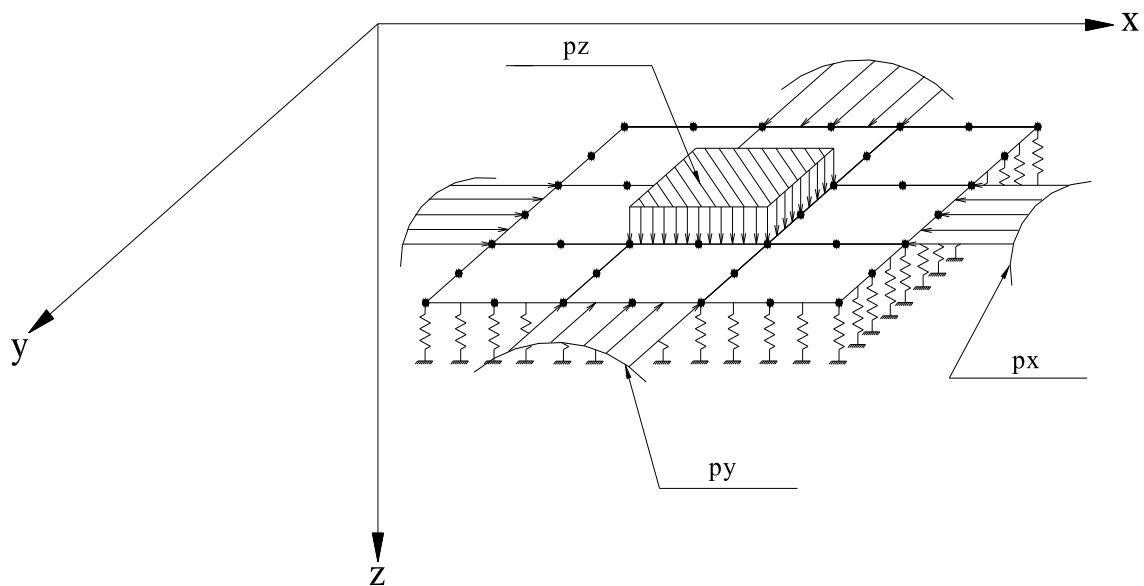


Figura 1 – Carregamento e aspectos geométricos da placa

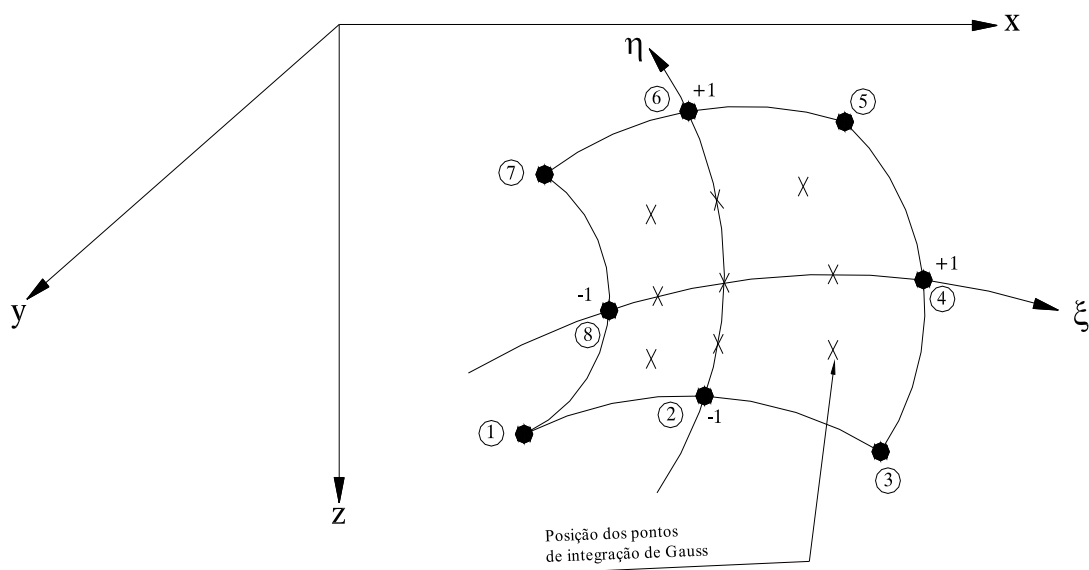


Figura 2 – Geometria do elemento isoparamétrico quadrático

A análise da estrutura é feita combinando-se a teoria de placas espessas de Mindlin com a formulação para estado plano de tensão. Desta forma, além de estar submetida aos esforços de flexão, a placa poderá suportar esforços normais e tangenciais contidos em seu plano médio.

Para representar o solo, através do Princípio dos Trabalhos Virtuais, é incluída uma base elástica uniforme sob toda a superfície do elemento ref.[13].

Para permitir o estudo de situações que envolvem pequenas deformações com grandes deslocamentos as componentes não-lineares de deformação para placas foram incluídas na formulação ref.[14].

O sistema de equações não-lineares de equilíbrio é resolvido através do Método BFGS, com a adição de *line-searches* ref.[11].

3. MODELOS CONSTITUTIVOS PARA OS MATERIAIS

1. Modelo constitutivo bidimensional para o concreto

O concreto é representado através de um modelo bidimensional, ortotrópico, empregando-se o conceito de deformação uniaxial equivalente ref.[5] e o critério de ruptura biaxial de Kupfer e Gerstle [9].

Para o concreto comprimido e para o concreto tracionado são empregados os diagramas tensão deformação recomendados pelo Código Modelo CEB-FIP 1990 ref.[4].

Após a fissuração, para incluir a colaboração do concreto entre fissuras na resistência aos esforços de tração, é adotado um ramo exponencial descendente para a relação tensão-deformação do concreto tracionado, conforme a Figura 3.

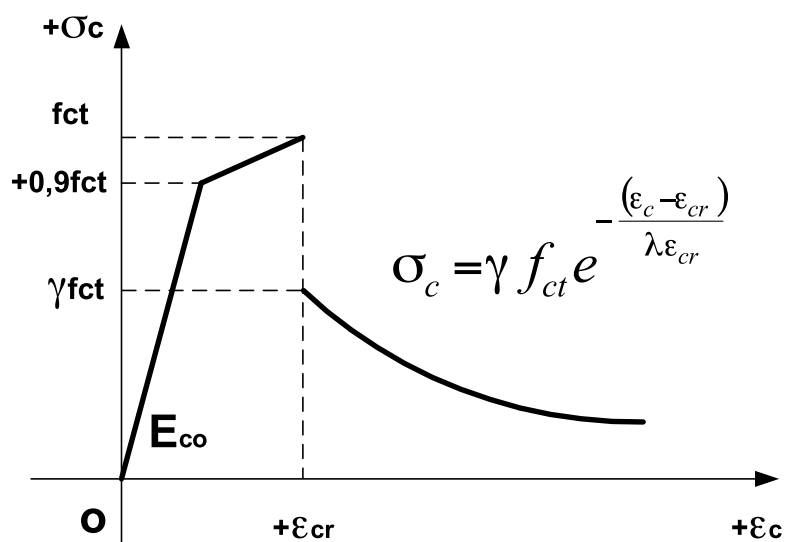


Figura 3 – Modelo para o concreto tracionado

Considera-se que a orientação da fissura permaneça fixa durante o carregamento. Para incorporar a transmissão de esforços cortantes ao longo do plano da fissura é empregado um módulo de deformação por corte reduzido.

A espessura da placa é dividida em camadas. Em cada camada são calculadas as deformações específicas. A partir das deformações são calculadas as tensões, conforme as equações constitutivas acima. Os esforços normais e momentos fletores resultantes são obtidos integrando-se as tensões ao longo da espessura.

3.2. Modelo para a armadura

A armadura é representada como uma camada mais rígida dentro do concreto, que apenas resiste a esforços axiais na direção das barras de aço. O aço é considerado como um material elasto-plástico com endurecimento após o escoamento. Considera-se o seu comportamento em compressão igual ao de tração.

3. Modelo para o solo

O solo é modelado como elasto-plástico, reagindo apenas em problemas de contato unilateral, ou seja, o solo só oferecerá reação quando comprimido. Para modelar o solo, a hipótese de Winkler será adotada, na qual o solo é modelado por molas distribuídas continuamente ao longo da superfície do elemento, e as pressões de contacto são proporcionais aos recalques, até ser atingida a pressão que leva a plastificação do solo. A pressão de contacto em um ponto qualquer no interior do elemento de placa será calculada pela seguinte expressão

$$p_s = k w \quad (1)$$

onde k é o coeficiente de reação vertical do terreno, e w a deflexão vertical no ponto considerado.

4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

1. Placa sobre base elástica sob carga concentrada e força normal de compressão distribuída ao longo dos bordos

Neste exemplo, é feita a análise não-linear geométrica de uma placa quadrada sobre base elástica e apoiada nos seus quatro lados, com carga concentrada no centro e sob forças de compressão uniformemente distribuídas ao longo de seus bordos, conforme apresentado na Figura 4.

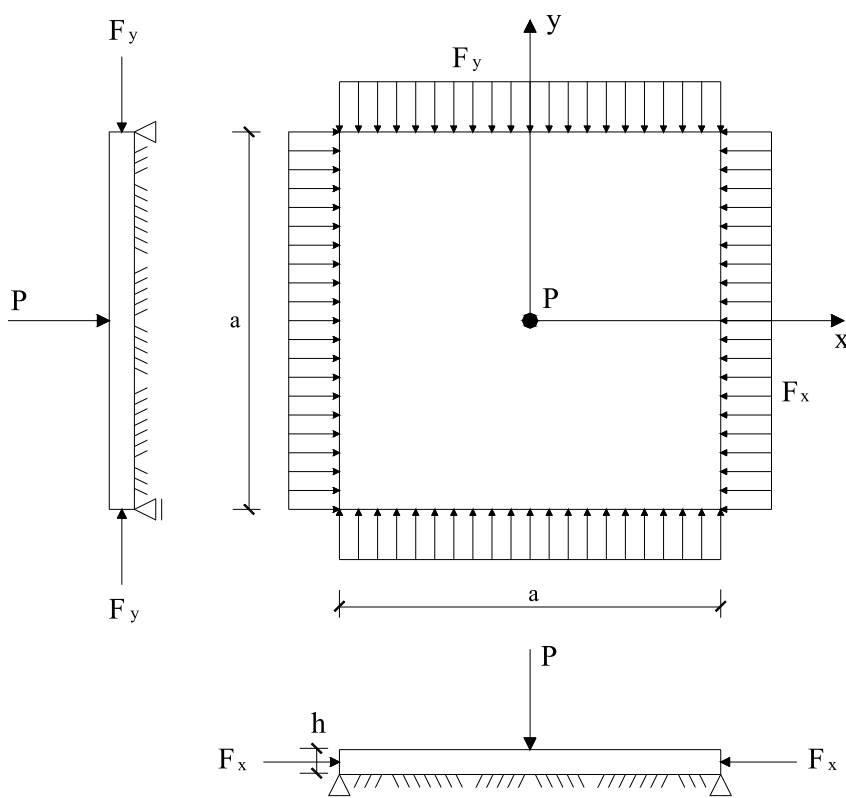


Figura 4 – Placa quadrada sobre base elástica

Foram estudados dois tipos de bases, com diferentes coeficientes de reação vertical. A Tabela 1 contém as propriedades geométricas e mecânicas, bem como o carregamento empregado no exemplo. Na formulação do exemplo usou-se apenas $\frac{1}{4}$ da placa por causa da

sua simetria em relação aos dois eixos de referência. A malha de elementos finitos usada na discretização foi de 40x40cm, com um número total de 25 elementos e 96 nós.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas, geométricas e carregamento

Propriedades			Carregamento
Geométricas	Mecânicas		
	Concreto	Solo	
a = 400cm	E = 2500 kN/cm ²	k ₁ = 1,2x10 ⁻² kN/cm ³	P = 100kN
h = 10cm	ν = 0,20	k ₂ = 3,6x10 ⁻³ kN/cm ³	F _{x1} = F _{y1} = 0 - 120 kN/cm
			F _{x2} = F _{y2} = 0 - 50 kN/cm

Na Figura 5 estão apresentados os resultados obtidos pelo modelo para a deflexão do ponto central da placa e sua solução analítica, extraída de Timoshenko [16]. Observa-se que quando há um aumento no coeficiente de reação do solo há também um aumento na capacidade de carga da placa.

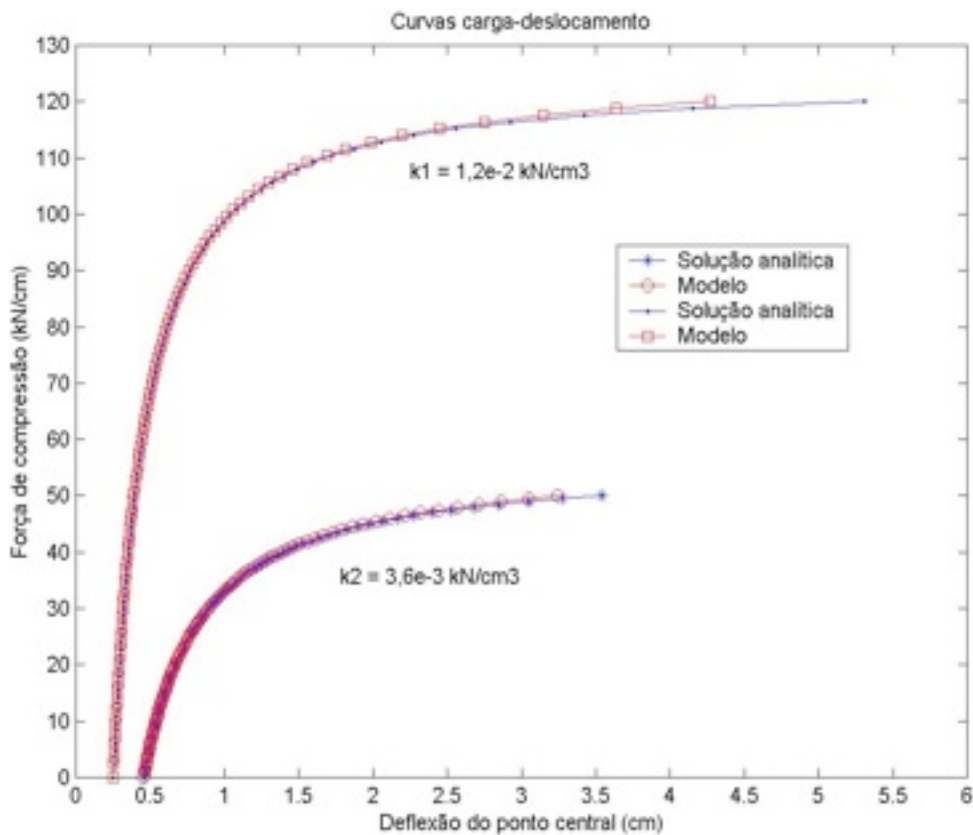


Figura 5 – Curva carga-deslocamento do ponto central

2. Laje de concreto armado sob carga concentrada: Laje de McNeice

Uma laje quadrada, apoiada apenas em seus quatro cantos e submetida a uma carga concentrada no centro foi ensaiada por Jofriet e Mcneice [8]. Este experimento tem sido utilizado por diversos pesquisadores para testar modelos numéricos para o comportamento de lajes de concreto armado.

A geometria da laje, a disposição das armaduras e a malha de elementos finitos empregada na análise, são mostradas na Figura 6. As propriedades mecânicas dos materiais que foram adotadas se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais e carregamento da laje de McNEICE

Propriedades dos materiais		Carregamento
Concreto	Aço	
$E = 2860 \text{ kN/cm}^2$	$E_{s1} = 20000 \text{ kN/cm}^2$	P = 0 a 15 kN
$\nu = 0,15$	$E_{s2} = 0,00$	
$f_c = 3,80 \text{ kN/cm}^2$	$f_y = 41,34 \text{ kN/cm}^2$	
$f_{ct} = 0,38 \text{ kN/cm}^2$		

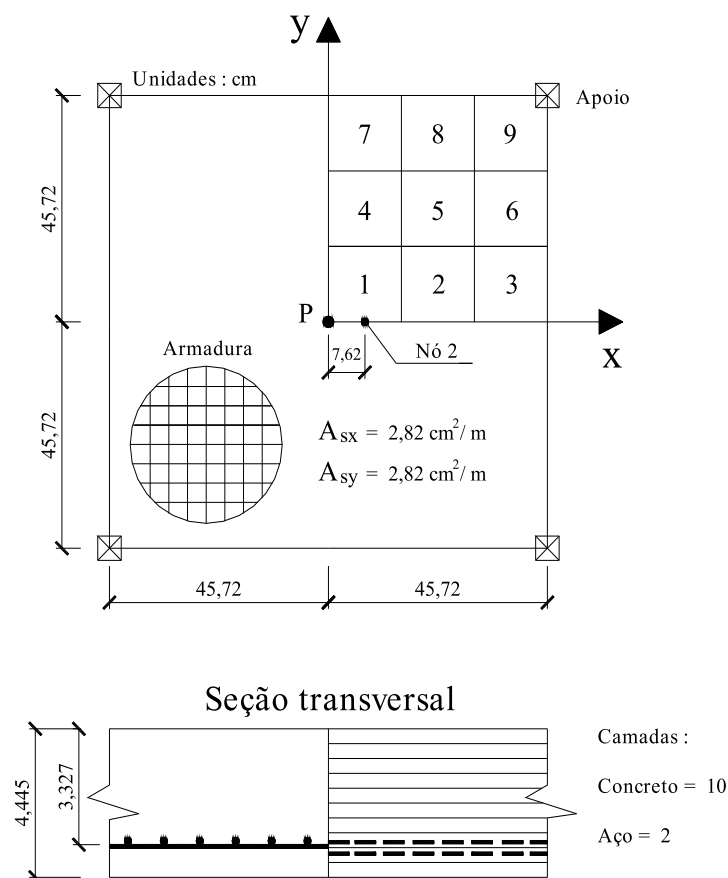


Figura 6 – Laje de McNEICE

A Figura 7 permite comparar a curva experimental carga-deslocamento para o ponto $x=7,62\text{cm}$ e $y=0,00$ (nó 2), com os resultados obtidos para os tipos de abordagem do problema.

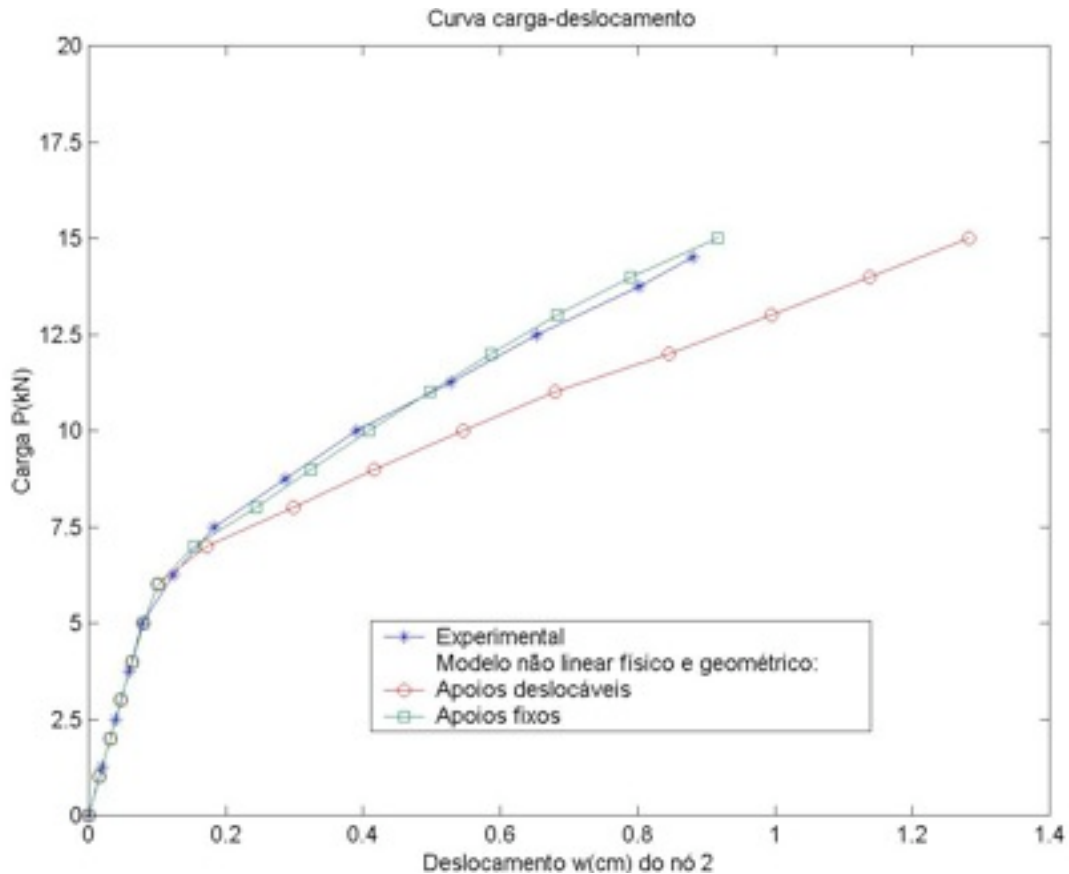


Figura 7 – Curvas carga-deslocamento: Laje de McNEICE

Após a fissuração, a superfície neutra da laje desloca-se para cima, então o plano médio passa a ser tracionado, sofrendo uma expansão e empurrando os apoios nos cantos para fora. Se os apoios forem fixos, impedindo a laje de dilatar-se, surgem esforços normais de compressão que restringem a fissuração da laje e acabam por tornar a sua resposta estática mais rígida.

3. Pavimento portuário em concreto armado para guindaste fixo

4.3.1. Descrição do problema

O exemplo consiste no cálculo de uma laje de concreto armado sobre base elástica, e submetida a cargas concentradas provenientes dos apoios de um guindaste, e possuindo os

quatro bordos livres. Na análise também são considerados o peso próprio da laje e uma sobrecarga accidental.

Na Figura 8 são apresentadas as propriedades geométricas da laje, a posição do carregamento, bem como a malha de elementos finitos usada na discretização.

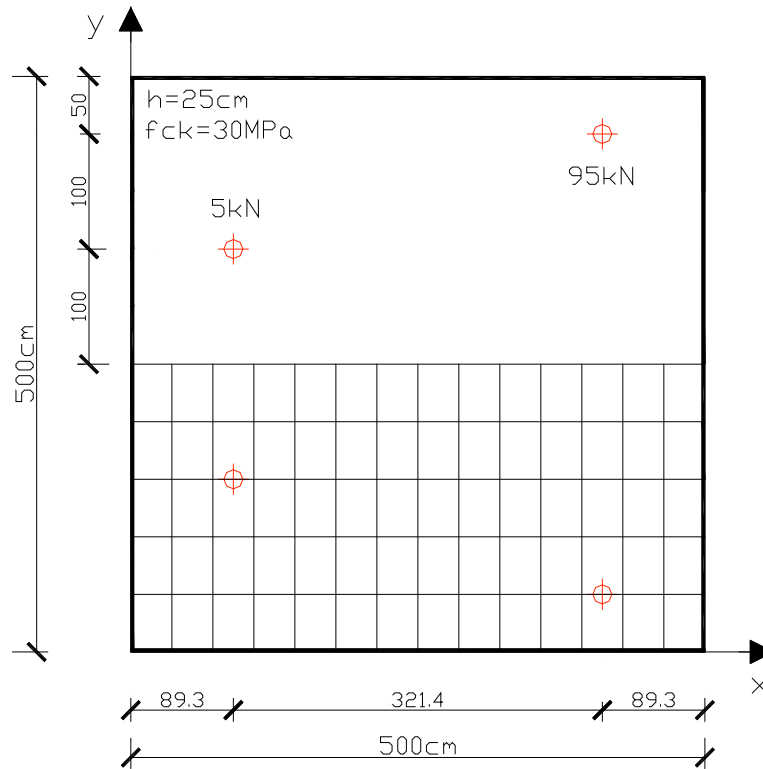


Figura 8 – Geometria, carregamento e malha

Por ser o carregamento simétrico em relação ao eixo horizontal central, modelou-se metade da laje, resultando um total de 70 elementos e 249 nós, com uma malha de 35,71x50cm.

4.3.2. Projeto da laje

Para o dimensionamento das armaduras é feita uma análise elástica-linear da laje sob carga de serviço, através do modelo. Considera-se a laje com os quatro bordos livres, e assente sobre um solo estabilizado, sendo este, o solo de maior rigidez apresentado neste exemplo. Com os esforços solicitantes obtidos, são calculadas as armaduras. Na Tabela 3 são apresentadas as propriedades usadas no dimensionamento da laje.

Tabela 3 – Propriedades usadas no projeto da laje

Propriedades geométricas	Propriedades dos materiais			Carregamento
	Concreto	Aço	Solo	
				o

Largura = 250 cm	$E = 3355 \text{ kN/cm}^2$	$E_{s1} = 21000 \text{ kN/cm}^2$	$k = 0,149 \text{ kN/cm}^3$	$g = 6,25 \times 10^{-4} \text{ kN/cm}^2$ (peso próprio)
Comprimento = 500 cm	$\nu = 0,20$	$E_{s2} = 0,00$		$P = 5 \text{ kN e } 95 \text{ kN}$ (apoios do guindaste)
Espessura = 25 cm	$f_c = 3,80 \text{ kN/cm}^2$ $f_{ct} = 0,29 \text{ kN/cm}^2$	$f_y = 54,48 \text{ kN/cm}^2$		$q = 50 \times 10^{-4} \text{ kN/cm}^2$ (sobrecarga)

Na Figura 9 são apresentadas as armaduras obtidas através da análise dos esforços solicitantes.

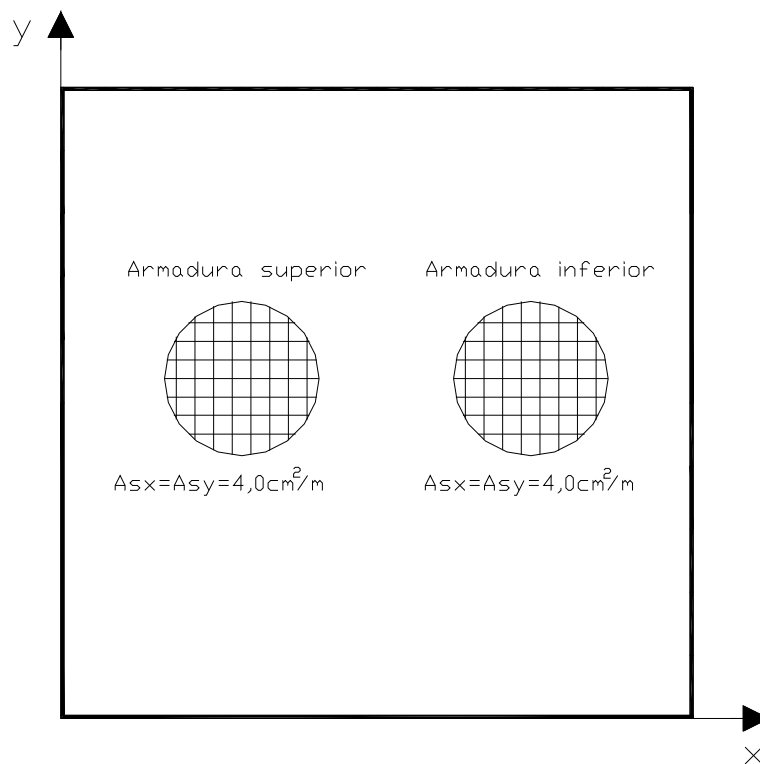


Figura 9 – Armaduras

4.3.3. Análise da laje considerando diferentes coeficientes de reação vertical do terreno

Na primeira análise, o solo é melhorado através da adição de uma camada de cinza de carvão mineral mais cal sobre o terreno existente. Na segunda análise, a placa é assentada diretamente sobre o terreno de areia compactada. Finalmente, na terceira análise, a placa é assentada diretamente sobre o terreno de areia de média compacidade. Nas três análises, as

propriedades usadas estão apresentadas na Tabela 3, porém o coeficiente de reação vertical k é o do respectivo solo usado na análise.

Para a análise da laje sobre solo estabilizado foi adotado um coeficiente de reação vertical k do terreno igual a $14,9 \times 10^{-2} \text{ kN/cm}^3$. Na Figura 10, estão apresentadas as pressões de contacto entre a laje e o solo para a carga de serviço, e nas Figuras 11 e 12 é apresentada a distribuição dos momentos fletores M_x e M_y no interior da placa, respectivamente.

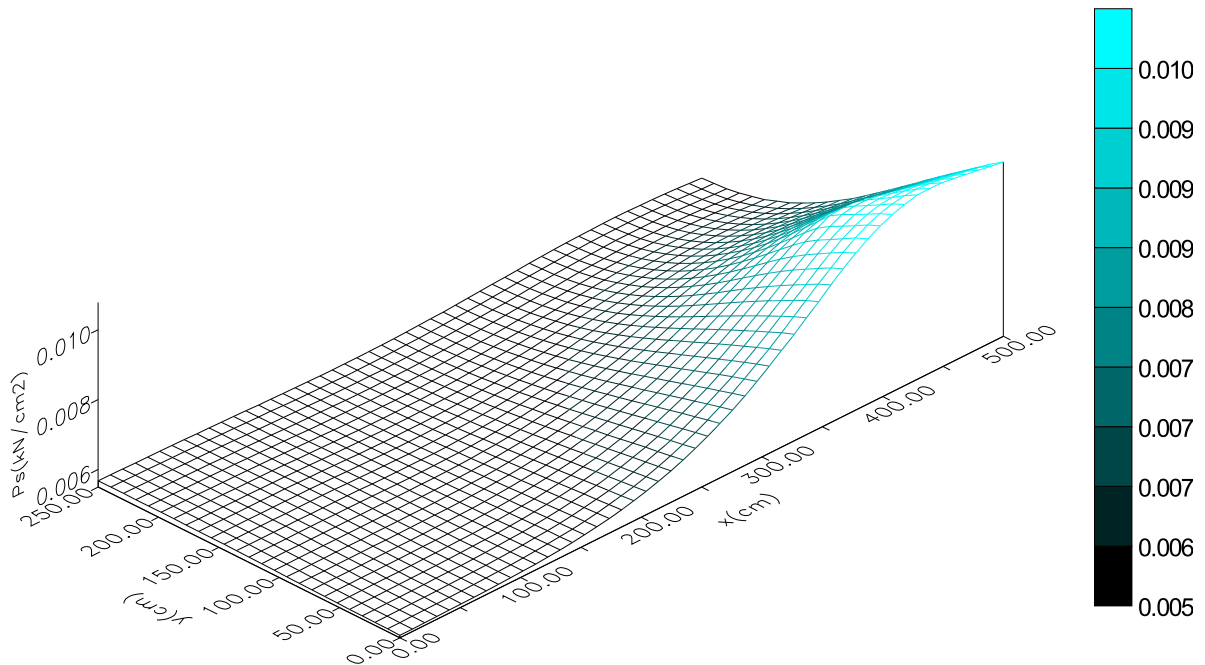


Figura 10 – Distribuição da pressão de contacto solo-laje para carga de serviço

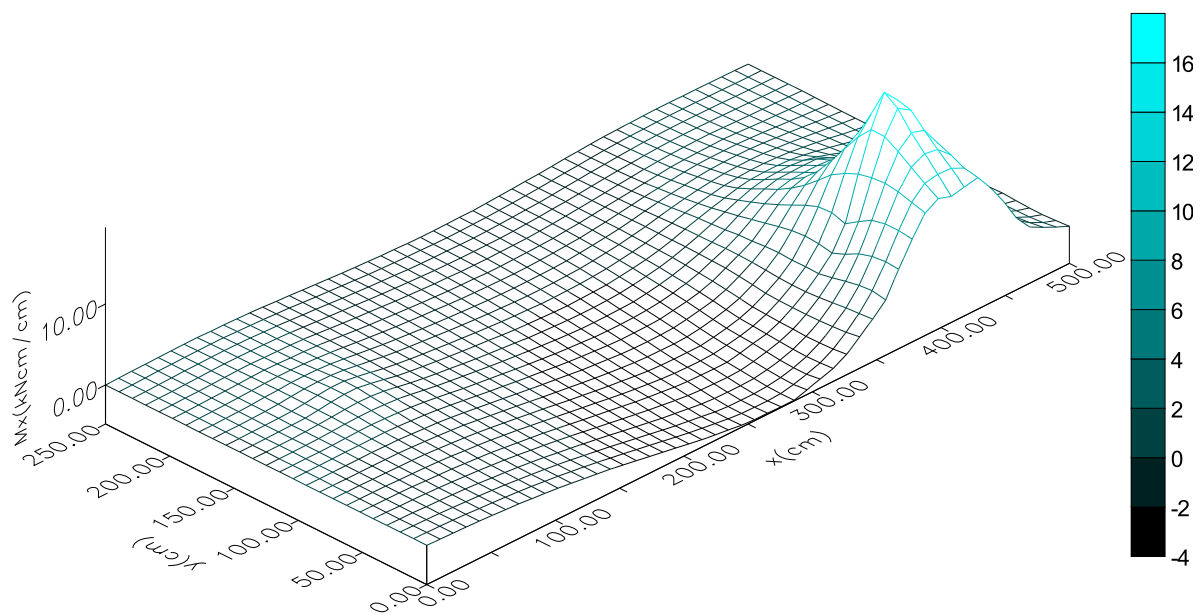


Figura 11 – Distribuição do momento fletor M_x para carga de serviço

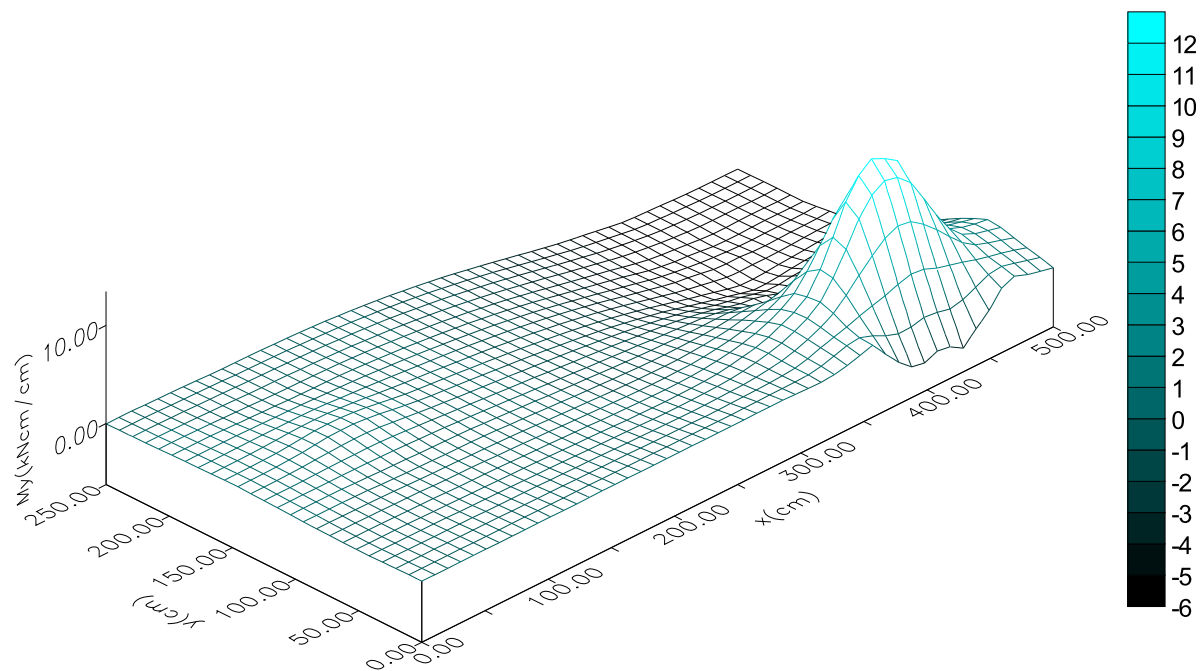


Figura 12 – Distribuição do momento fletor M_y para carga de serviço

É importante salientar que nesta análise da laje sob carga de serviço não houve plastificação do solo em nenhum ponto, também não houve escoamento da armadura da laje, porém há fissuração do concreto em alguns pontos próximos da carga de maior intensidade.

Para a laje assente sobre areia compactada foi adotado um coeficiente de reação vertical igual a $4,6 \times 10^{-2}$ kN/cm³. Como última análise, a placa foi assentada sobre um solo em areia de média compactidade, sendo que o coeficiente de reação vertical para este solo é $1,75 \times 10^{-2}$ kN/cm³.

A análise foi feita incrementado-se sucessivamente as cargas de serviço da laje até que um dos componentes do sistema sofra a ruptura. Poderá haver esmagamento do concreto, deformação plástica excessiva da armadura, ou plastificação do solo no qual o sistema laje de concreto armado sobre base elástica não é mais capaz de fornecer esforços resistentes que anulem as forças externas.

No caso de esmagamento do concreto ou deformação plástica excessiva da armadura, o modelo interromperá a análise ao detectar tais deformações. Já no caso de plastificação do solo, o modelo não conseguirá atingir a convergência.

Na Figura 13 são apresentadas as curvas carga-deslocamento do ponto que apresentou as maiores deflexões, próximo da carga de maior intensidade.

Para cada tipo de solo é determinada a carga total aplicada sobre a laje, em kN, que causará uma das rupturas descritas anteriormente.

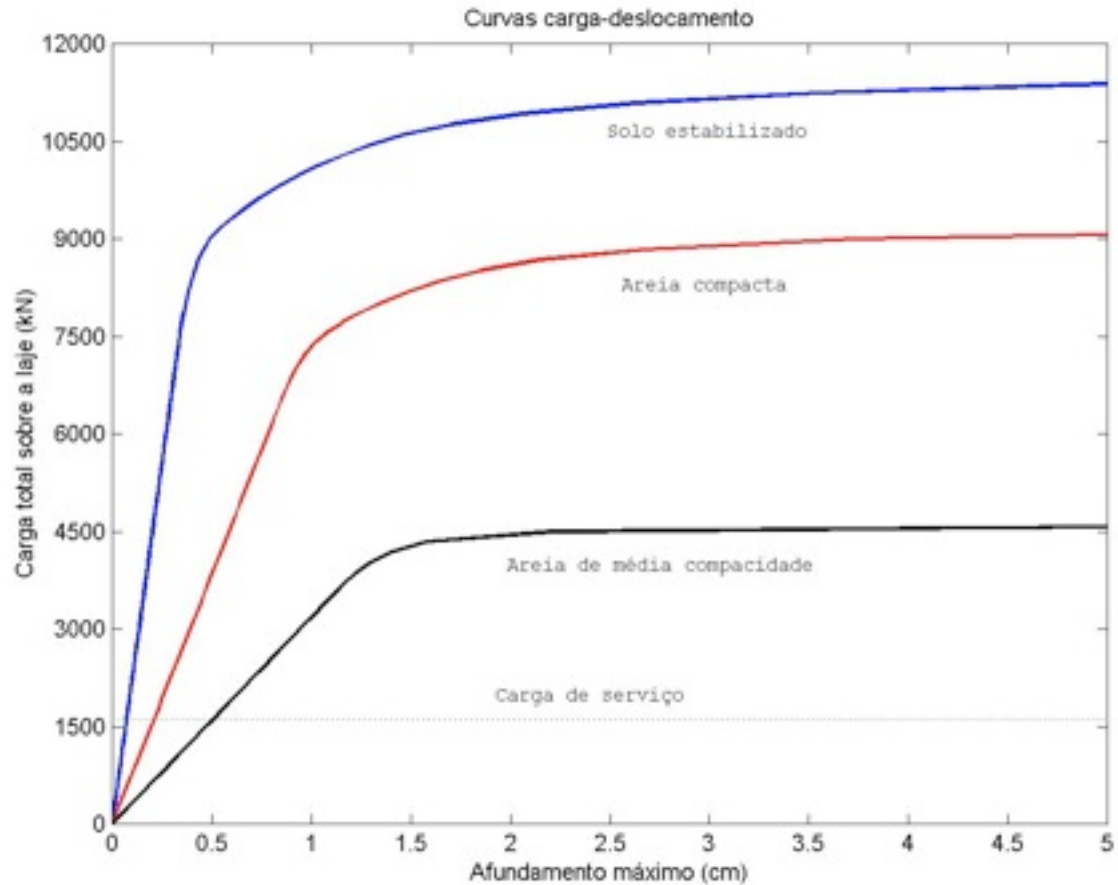


Figura 13 – Curvas carga-deslocamento do ponto de maior deflexão para diferentes tipos de solo

Nas três análises apresentadas na Figura 13, a ruptura ocorreu por deformação plástica excessiva da armadura inferior, em pontos próximos à carga de maior intensidade.

4.3.4. Análise da laje considerando diferentes espessuras

Para avaliar o efeito da espessura da laje no comportamento do conjunto laje+solo, foram adotadas espessuras de 15cm, 25cm e 35cm para a placa de concreto armado. Os esforços foram recalculados em uma análise elástica linear, e as armaduras redimensionadas em cada caso. Os demais dados do problema foram mantidos constantes (Tabela 3), considerando-se o solo estabilizado com cinza-cal.

A Figura 14 mostra as curvas carga-deslocamento do ponto de maior deflexão, para as três espessuras de laje consideradas.

Observa-se que a espessura da laje influi bastante tanto na resposta carga-afundamento, como na carga de ruptura do sistema laje+solo.

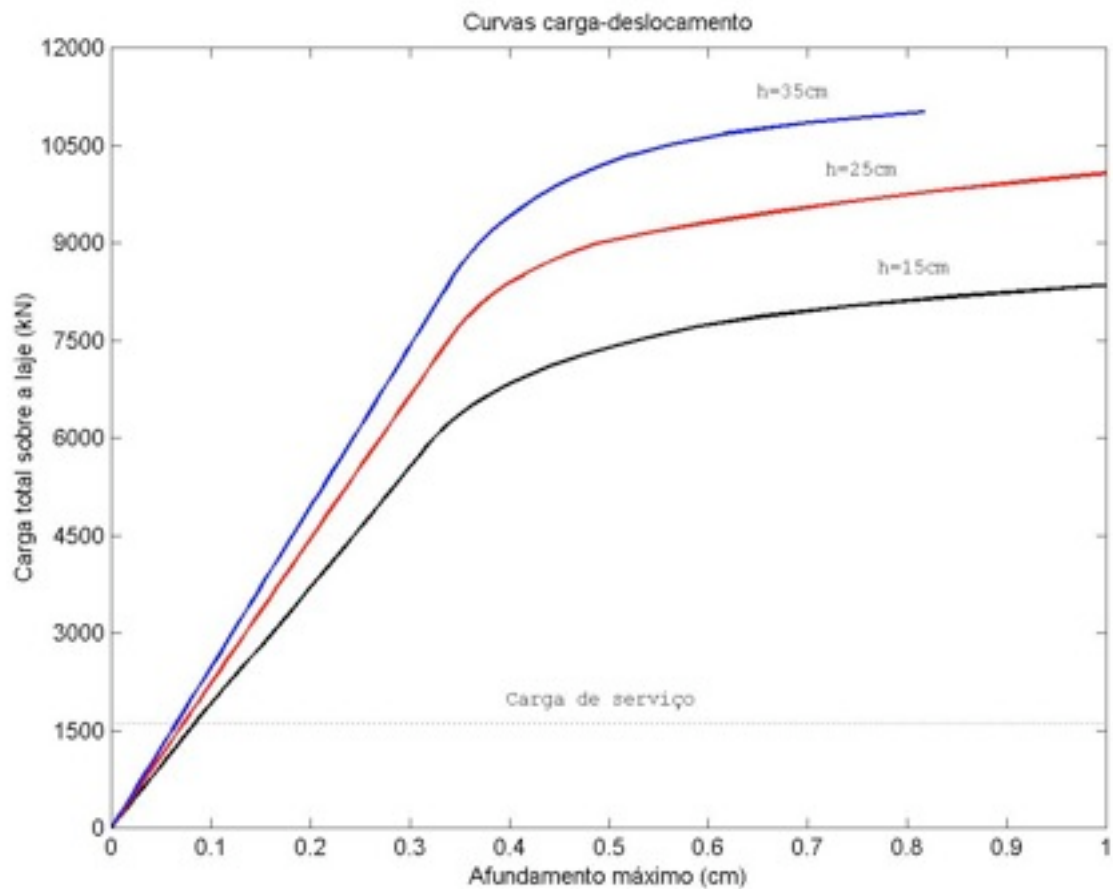


Figura 14 – Curvas carga-deslocamento do ponto de maior deflexão para diferentes espessuras de laje

4.3.5. Análise da laje considerando diferentes valores para o f_{ck} do concreto

Para estudar a influência da resistência característica à compressão do concreto adotada no projeto da laje no comportamento do conjunto laje+solo, foram considerados concretos de 20 MPa, 30 MPa e 40 MPa. As propriedades do concreto foram redefinidas em cada situação de acordo com o Código Modelo CEB-FIP 1990 ref.[4]. Os esforços foram recalculados em uma análise elástica linear, e as armaduras redimensionadas em cada caso. Os demais dados do problema foram mantidos constantes (Tabela 3), considerando-se o solo estabilizado com cinza-cal.

A Figura 15 apresenta as curvas carga-deslocamento do ponto de maior deflexão, para os três valores de f_{ck} do concreto considerado.

Observa-se que o valor da resistência característica à compressão do concreto da laje influi pouco tanto na resposta carga-afundamento, como na carga de ruptura do sistema laje+solo.

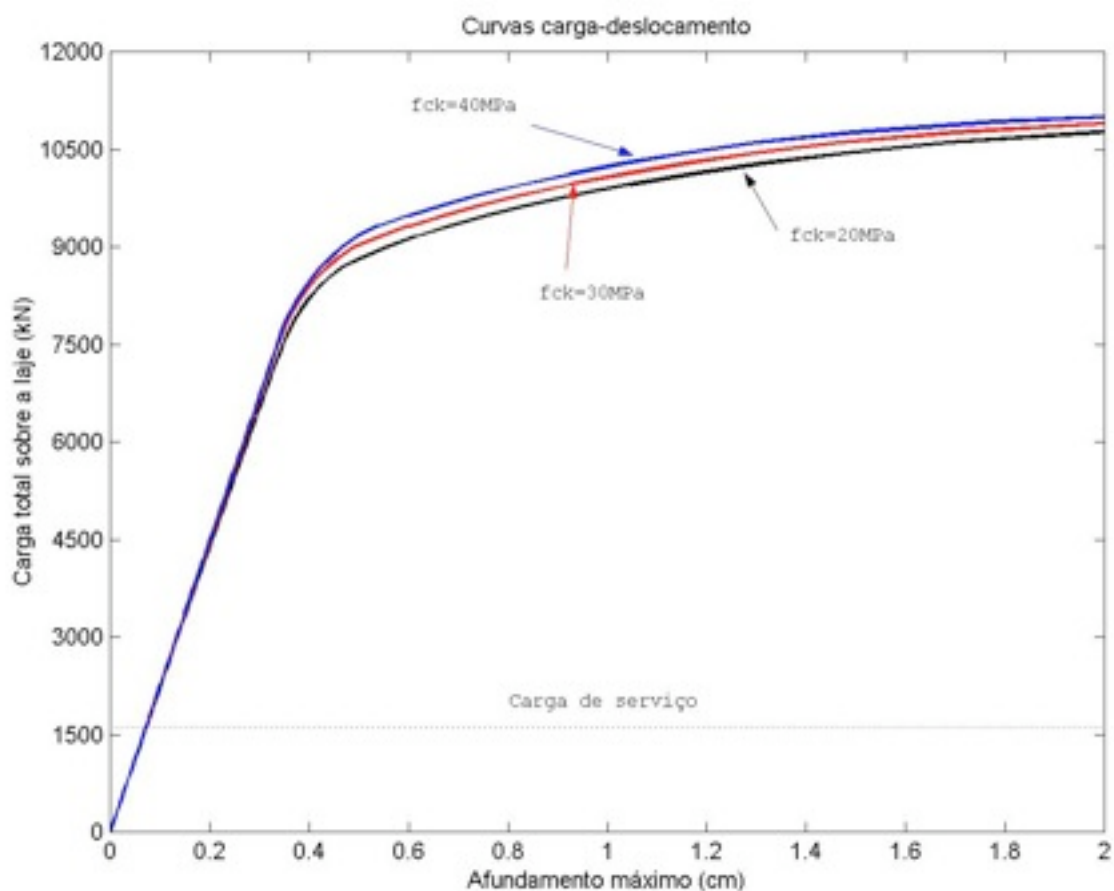


Figura 15 – Curvas carga-deslocamento do ponto de maior deflexão para diferentes valores da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck})

4.3.6. Análise da laje considerando diferentes taxas de armadura

Para verificar como um aumento na taxa de armadura de flexão da laje afeta o comportamento do conjunto laje+solo, foram empregadas taxas de armadura (ρ) iguais à metade e ao dobro daquela determinada no dimensionamento. Os demais dados do problema foram mantidos constantes (Tabela 3), considerando-se o solo estabilizado com cinza-cal.

A Figura 16 mostra as curvas carga-deslocamento do ponto de maior deflexão, para as três taxas de armadura da laje consideradas.

Observa-se que a taxa de armadura da laje influi pouco tanto na resposta carga-afundamento, como na carga de ruptura do sistema laje+solo.

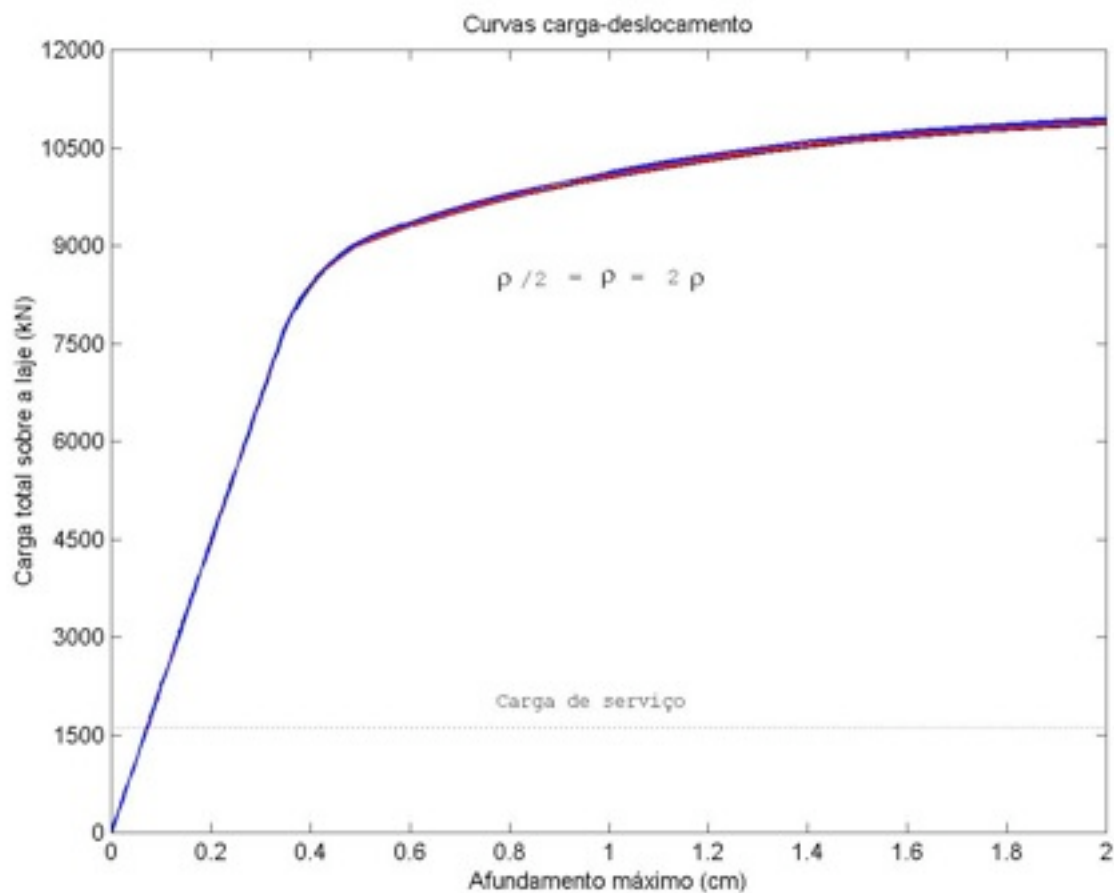


Figura 16 – Curvas carga-deslocamento do ponto de maior deflexão para diferentes taxas de armadura da laje

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um modelo para análise de pavimentos portuários formados por um sistema laje de concreto armado apoiada sobre solo, sob cargas de grande intensidade, através do método dos elementos finitos.

Problemas que envolvam diversos tipos de carregamentos tais como cargas concentradas, carga distribuídas e forças normais e tangenciais aplicadas nos bordos da placa podem ser estudados. Não-linearidades de origem física e geométrica também podem ser abordadas através do modelo.

Como se pode observar nos exemplos 4.1 e 4.2, os resultados obtidos pelo modelo têm boa concordância com a sua solução analítica ou com os resultados obtidos experimentalmente.

Para o problema 4.3, é importante observar como são distribuídas as pressões de contacto entre a placa e o solo, pois muitas vezes no dimensionamento de fundações considera-se que as pressões são uniformemente distribuídas em toda base.

É interessante observar-se, também, como são distribuídos os momentos fletores no interior de uma placa solicitada por cargas concentradas ainda sob carga de serviço.

O exemplo de pavimento portuário analisado mostra que o investimento na melhoria da capacidade de carga do solo que servirá de base para o assentamento da laje é compensador, tanto no que se refere ao seu comportamento em serviço, como no que tange a carga de ruptura do pavimento.

O estudo também mostrou que a espessura da placa é um fator determinante no comportamento do sistema laje+solo.

Variações na resistência característica à compressão do concreto da laje, bem como da taxa de armadura, não apresentaram uma influência muito significativa no comportamento do sistema laje+solo, para o exemplo analisado.

Ainda é válido ressaltar a importância de uma análise não-linear para o concreto armado, pois, como se pode observar através das Figuras 13-16, o concreto armado possui um comportamento altamente não-linear, tendo como uma das principais causadoras deste comportamento a fissuração do concreto.

Como a formulação permite à placa suportar esforços normais e tangenciais contidos em seu plano médio, futuramente incorporar-se-á os efeitos de protensão no modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto e execução de obras em concreto armado: NBR-6118*. Rio de Janeiro, 1980.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Ações em estruturas portuárias, marítimas ou fluviais: NBR-9782*.
3. BOWLES, J.E.. *Analytical and computer methods in foundation engineering*. New York, McGraw-Hill, 1974.
4. COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. *CEB-FIP model code 1990; design code*. London, Thomas Telford Services, 1993. 437p.
5. DARWIN, D.; PECKNOLD, D.A.. *Nonlinear biaxial stress-strain law for concrete*. Journal of Engineering Mechanics Division, v. 103, p. 229-241, Apr. 1977.
6. ERATIL, K.; AKÖZ, A.Y. *The mixed finite element formulation for thick plates on elastic foundations*. Computers & Structures, v. 65, n. 4, p. 515-529, 1997.
7. HETÉNYI, M.. *Beams on elastic foundation*. 11. ed. The University of Michigan Press, 1979.
8. JOFRIET, J.C.; McNEICE, G.M.. *Finite element analysis of reinforced concrete slabs*.

Journal of Structural Division, v. 97, n. 3, p. 977-993, Mar. 1971.

9. KUPFER, H.B.; GERSTLE, K.H. *Behavior of concrete under biaxial stresses*. Journal of Engineering Mechanics, v. 99, p. 853-866, Aug. 1973.

10. LIEW, K.V.; HAN, J.-B., XIAO, Z.M.; DU, H. *Differential quadrature method for Mindlin plates on Winkler foundation*. Int. J. Mech. Sci., v.38, n. 4, p. 405-421, 1996.

11. MATTHIES, H.; STRANG, G.. *The solution of nonlinear finite element equations*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 14, p. 1613-1626, 1979.

12. OWEN, D.R.J.; HINTON, E. *Finite elements in plasticity: theory and practice*. Swansea, Pineridge Press, 1980.

13. PALIGA, C. M. *Estudo da solução laje de concreto armado sobre base elástica para pavimentos portuários através do método dos elementos finitos*. Rio Grande, CPEO-FURG, 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica.

14. REAL, M. V. *Análise estática de lajes de concreto armado incluindo não linearidade física e geométrica*. Porto Alegre, PPGEC-UFRGS, 1990. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.

15. SILVA, A.R. *Análise de placas com restrições unilaterais de contato*. Ouro Preto, Escola de Minas, UFOP, 1998. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.

16. TIMOSHENKO, S.P.; WOINOWSKY-KRIEGER, S.. *Theory of Plates and Shells*. 2.ed. New York, McGraw-Hill, 1959.

17. VELLOSO, D.A.; LOPES, F.R.. *Fundações*. 2.ed.. Rio de Janeiro, COPPE/UF RJ, 1997.

18. VITORETI, M. M. *Análise da interação solo-estrutura em fundações de concreto armado pelo método dos elementos finitos*. Porto Alegre, PPGEC-UFRGS, 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.