

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE PLACAS EM CONTATO COM O SOLO DO MUNICÍPIO DE SINOP-MT

LINCON SUMIDA¹
LETÍCIA REIS BATISTA ROSAS²
BRUNO RODRIGUES DOS SANTOS²

RESUMO: A análise numérica por meio dos elementos finitos no estudo da interação solo-estrutura tem papel fundamental na Engenharia Civil. Este artigo apresenta dados de deslocamento de uma placa do tipo radier em contato com o solo de Sinop-MT. Utilizou-se o programa LISA que faz análise pelo método dos elementos finitos para discretizar a placa em malhas de 16, 64 e 128 elementos finitos bidimensionais. A representação do solo foi feita pelo método de molas discretas, utilizando o parâmetro de rigidez do solo de Sinop-MT estudado por Souza *et al* (2014) e Martins *et al* (2014). Foi observado que esses parâmetros do solo de Sinop-MT foram o que obtiveram os maiores deslocamentos quando comparados com outros valores típicos. Observou-se que onde tem os maiores carregamentos foram os que tiveram os maiores deslocamentos, e que quanto mais refinada a malha de elementos finitos, menores foram os deslocamentos. Para o parâmetro Souza *et al* (2014) o deslocamento central em uma malha de 128 elementos finitos foi de 54,72 mm, e para o parâmetro de Martins *et al* (2014) no mesmo ponto foi de 36,46 mm.

PALAVRAS-CHAVE: interação solo-estrutura; método dos elementos finitos, molas discretas, rigidez do solo.

NUMERICAL ANALYSIS OF PLATE BEHAVIOR IN CONTACT WITH THE MUNICIPAL SOIL OF SINOP-MT

ABSTRACT: Numerical analysis using finite elements in the study of soil-structure interaction has a fundamental role in Civil Engineering. This paper presents the displacement data of a Radier type plate in contact with the Sinop-MT soil. We used the LISA program that analyzes by the finite element method to discretize the plate in meshes of 16, 64 and 128 two-dimensional finite elements. The soil representation was done by the method of the discrete springs, using the soil stiffness parameter of Sinop-MT studied by Souza *et al* (2014) and Martins *et al* (2014). It was observed that these parameters for the soil of Sinop-MT were the ones that obtained the greatest displacements when

¹ Engenheiro Civil, UNEMAT, Av. dois Ingás, 3001, Sinop - MT, CEP 78555-000.

² Professor, Curso de Engenharia Civil, FACULDADE FASIFE, R. Carine, 11, Res. Florença, Sinop - MT. CEP: 78550-000. Endereço eletrônico: engenharia@fasipe.com.br

compared with other authors. It was observed that where the largest loads were those that had the main shifts, and that the more refined the mesh of finite elements, smaller the shifts. For the parameter Souza et al (2014) the central displacement in a mesh of 128 finite elements was 54.72 mm, and for the parameter of Martins et al (2014) at the same point was 36.46 mm.

KEYWORDS: soil-structure interaction; finite element method, discrete springs, soil stiffness.

1. INTRODUÇÃO

A análise do comportamento de elementos estruturais como placas, vigas e pórticos é uma das áreas mais importantes da análise estrutural, ou seja, a maioria das estruturas encontradas na engenharia atual é formada a partir da união desses elementos.

Na prática, esses elementos estruturais encontram-se apoiados em outros corpos ou superfícies que oferecem resistência a seus movimentos. Problema com o qual a estrutura pode entrar ou perder contato com outros corpos, ou mesmo com a superfície de suporte, como por exemplo, o solo.

Entre esses problemas, pode se destacar, o contato desses elementos estruturais com o solo do município de Sinop-MT que apresenta pouca resistência e baixo suporte de carga.

Por isso a análise do problema da interação solo e estrutura é área complexa devido à dificuldade na formulação e solução do problema. Mesmo para os casos em que se consideram pequenos deslocamentos, material com comportamento linear elástico e restrições bilaterais de contato a resolução do problema é uma tarefa difícil.

Devido essa dificuldade surge a análise numérica e computacional em que se aplica o Método dos Elementos Finitos (MEF), muito utilizado na análise de problemas estruturais complexos. Sendo assim, com a eficiência computacional e a visualização gráfica dos dados processados e gerados espera-se obter respostas satisfatórias.

Nesse trabalho, avaliou-se numericamente o comportamento de placas em contato com o solo de Sinop-MT. Observou-se também a melhoria na compreensão sobre o comportamento dessas estruturas quando existir a interação solo-estrutura nessa região.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Interação Solo-Estrutura

Muitos estudos têm sido realizados em busca de se obter uma modelagem mais realística do sistema solo-estrutura. A importância do estudo dessa interação deve-se à dificuldade de representar o comportamento da estrutura assim como do solo. Na

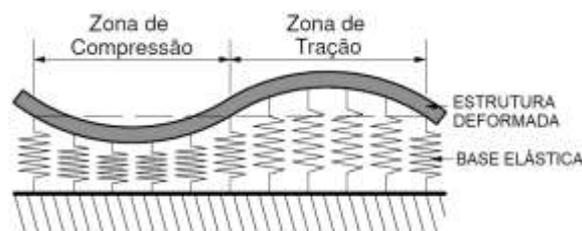
engenharia é comum esse contato solo-estrutura como, por exemplo, em muros de contenção, túneis, trilhos de trem e sapatas diretas (rasas) ou profundas (ROSAS, 2016).

Holanda Jr. (1998) afirma que o desempenho estrutural de um edifício é função da interação entre os elementos da superestrutura, da infraestrutura e do maciço de solo subjacente em contraposição à concepção passada que considera apenas ligação estrutura-base rígida.

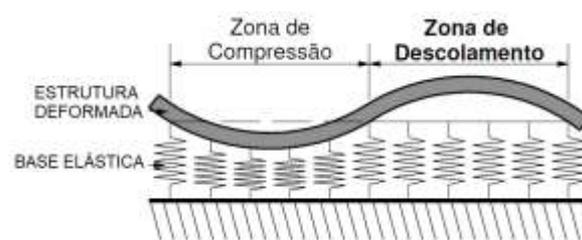
Segundo Colares (2006) denomina-se interação solo-estrutura o mecanismo de influência mútua superestrutura-sistema de fundação. A ação inicia-se na fase de construção e continua até que se atinja um estado de equilíbrio, em que as tensões e as deformações estão estabilizadas, tanto da estrutura como do maciço de solos.

Conforme Antoniazzi (2011) a deformabilidade do solo pode ser representada por meio de molas elásticas no contorno estrutura-solo e deve se conhecer o coeficiente de mola ou módulo de reação vertical que representará a deformabilidade do solo. A obtenção do módulo pode ser por ensaio de placa.

De acordo com Machado (2013) no contato bilateral, Figura 1a, não há perda de contato entre os elementos, ou seja, o conjunto trabalha integralmente ao longo do contato entre eles. Isso significa que a região de contato entre os corpos pode ser resolvida de forma linear. No caso unilateral, Figura 1b, a região de contato entre os corpos vai depender da deformação da estrutura para uma determinada solicitação.



a) Contato bilateral



b) Contato unilateral

Figura 1 - Perfil dos tipos de contato
Fonte: adaptado de MACHADO, 2013

Segundo Silva (1998) a interação entre solo e estrutura pode ser definida como bilateral ou unilateral. No caso em que o solo reage tanto às solicitações de tração quanto às de compressão esse contato é chamado de bilateral, e no caso em que o solo reage apenas às solicitações de compressão é denominado de unilateral. A Figura 1 demonstra a diferença das duas situações para o caso linear.

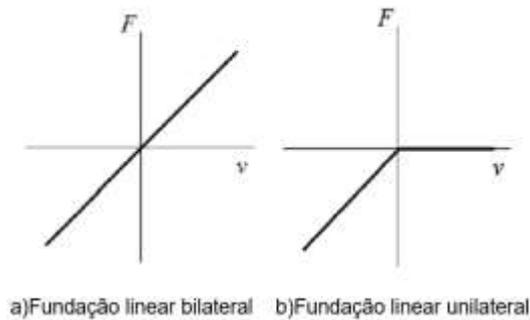


Figura 2 - Relação força-deslocamento da fundação
Fonte: ROSAS, 2016

Na Figura 2a nota-se que a relação F-força e v-deslocamento é linear, indicando rigidez constante do solo e que a fundação oferece reação às solicitações de tração e compressão. Na Figura 2b tem-se o contato unilateral de comportamento linear e que reage apenas às solicitações de compressão (ROSAS, 2016).

2.2 Modelo de Bases Elásticas

A modelagem para uma fundação elástica considerada a mais simples é a que apresenta apenas um parâmetro. Dentre esses modelos tem-se o de molas discretas dispostas ao longo da região de contato e o modelo de Winkler. O modelo de Pasternak considera dois parâmetros para definir o comportamento do solo, o que melhora o modelo proposto por Winkler (SILVA, 1998; MACIEL, 2012; ROSAS 2016). A Figura 3 demonstra o comportamento do solo para estes modelos.

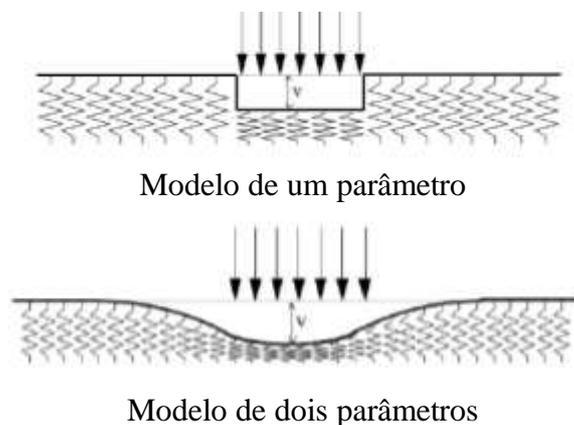


Figura 3 - Curvas de deslocamentos da base elástica
Fonte: ROSAS, 2016

2.2.1 Modelo de Molas Discretas

De acordo com Rosas (2016) as molas discretas representam o solo e são dispostas ao longo da região de contato. Elas são independentes entre si e não há interação entre as mesmas. A Figura 4 representa esse modelo de uma viga repousando sobre uma fundação.

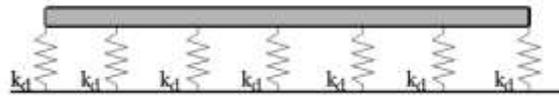


Figura 4 - Modelo de molas discretas representando o solo
Fonte: ROSAS, 2016

Na discretização via Método dos Elementos Finitos, a malha deve ser formada em que os nós coincidam com o posicionamento das molas. Para a reação da base elástica, tem-se a expressão.

$$r_b = k_d * v_b |_{(x_i, y_i)} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

r_b : reação da base

v_b : deslocamento da base elástica

k_d : parâmetro de rigidez da mola (unidade de força por comprimento)

(x_i, y_i) : representa a posição dos nós da estrutura e da base elástica que estão em contato.

2.2.2 Modelo Winkler

O modelo de Winkler é formado por uma camada de molas estreitamente espaçadas e independentes entre si. Nesse modelo, a reação exercida em um dado ponto da região de contato é proporcional ao deslocamento vertical da estrutura nesse mesmo ponto, independente dos deslocamentos em outras partes da estrutura em contato (WINKLER, 1867). A Figura 5 representa esse modelo.

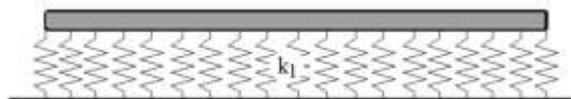


Figura 5 - Modelo de Winkler representando a região de contato

Fonte: ROSAS, 2016

Pode ser expressa por:

$$r_b = k_1 * v_b \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

r_b : reação da base

k_1 : parâmetro de rigidez da mola (unidade de força por área)

v_b : deslocamento da base elástica

O valor do parâmetro de rigidez da mola k_1 que representará o solo a ser estudado é a maior dificuldade para se quantificar no modelo de Winkler. Na prática esse

parâmetro é determinado por meio de ensaio de carregamento de placa, em que se aplica um carregamento vertical e perpendicular à placa e mede-se seu deslocamento.

2.2.3 Modelo de Pasternak

O modelo de Pasternak (PASTERNAK, 1954) considera que as molas são ligadas por uma camada incompressível que se deforma apenas sob tensões de cisalhamento conforme a Figura 6.

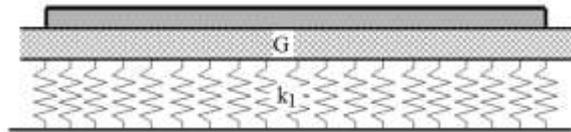


Figura 6 - Modelo de Pasternak representando a região de contato

Fonte: ROSAS, 2016

Esse modelo estabelece uma interação entre as molas usadas no modelo de Winkler, e tem-se:

$$r_b = k_1 * v_b - G \nabla^2 * v_b \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

r_b : reação da base

v_b : deslocamento da base elástica

k_1 : parâmetro de rigidez da mola (unidade de força por área)

G : parâmetro de rigidez cisalhante da camada

2.3 Formulação dos elementos finitos

Segundo Souza (2013) a precisão do método depende da quantidade de nós e elementos presentes na malha, Figura 7.

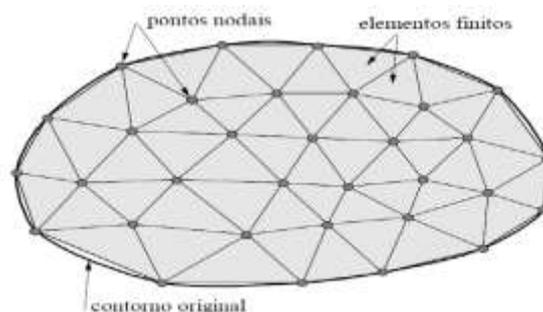


Figura 7 - Malha de elementos finitos bidimensional

Fonte: SOUZA, 2013

Embora se trate de um método aproximado quanto menor for o tamanho e maior for o número de elementos em uma determinada malha mais precisos serão os resultados da análise.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) visa discretizar (dividir) o meio contínuo em subelementos que são interligados por pontos nodais, no qual se define os graus de liberdade a serem determinados. Os resultados obtidos pelo MEF são mais precisos quanto maior for o refinamento da malha, conduzindo à solução do problema (ROSAS, 2016).

O comportamento de um elemento de acordo com Souza (2013) é definido pelo número e posicionamento dos nós e pelo número de graus de liberdade por nó. Em problemas de análise de tensões, os graus de liberdade dos nós correspondem aos possíveis movimentos que estes podem sofrer. No caso plano, existem três graus de liberdade por nó (duas translações). Estes movimentos dos nós são as incógnitas principais da análise pelo MEF.

2.4 Teoria das Placas

De acordo com Fernandes (1998) uma placa é um elemento estrutural plano caracterizado como sendo uma das dimensões muito menor quando comparada com as outras duas num sistema cartesiano de referência.

A placa, conforme Waideman (2008), sofre esforços de flexão devido a carregamentos perpendiculares ao seu plano médio. A Figura 8 demonstra as tensões atuantes na seção transversal de uma placa constituída por um material homogêneo e elástico linear provocado por uma carga distribuída p .

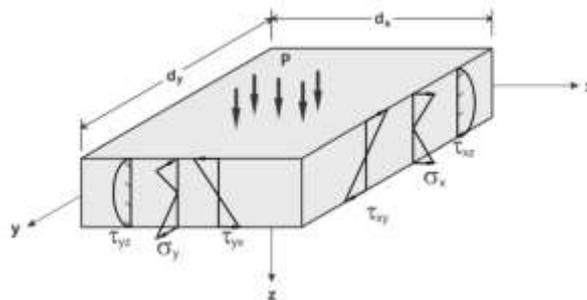


Figura 8 - Forças atuantes em uma placa
Fonte: adaptado WAIDEMAN, 2008

Verifica-se que as tensões normais σ_x e σ_y variam linearmente com a direção z e estão associadas aos momentos fletores M_x e M_y , e a tensão cisalhante τ_{xy} varia linearmente com z . As tensões de cisalhamento transversais τ_{xz} e τ_{yz} variam quadraticamente em relação à direção z e, a tensão normal σ_z é considerada desprezível em relação à magnitude das tensões σ_x , σ_y e τ_{xy} .

2.4.1 Teoria de Kirchhoff

A teoria de flexão de placas de Kirchhoff que é utilizada apenas para placas consideradas delgadas na qual se entende como um elemento com pequenos deslocamentos transversais, ou seja, considera a hipótese de que as deflexões são pequenas, as normais à superfície média indeformada permanecem normais à superfície média deformada e a tensão normal é considerada desprezível e as deformações transversais de cisalhamento são considerada nulas (SILVA, 1998).

2.4.2 Teoria de Mindlin

A teoria de Mindlin incorpora o efeito das deformações angulares na direção transversal no estudo de flexão de placas ao postular que uma linha reta e normal à superfície média da placa antes do carregamento permanece reta, mas não necessariamente normal a esta superfície após as deformações. Logo as deformações angulares devido às tensões de cisalhamento são inclusas na formulação. Esta teoria pode ser aplicada em placas delgadas ou em placas espessas (HOLANDA, 2000).

Segundo Carvalho (2004) um parâmetro que influencia a performance dos elementos é a razão da espessura da placa sobre o comprimento do lado menor da placa. Conforme a espessura as deformações de cisalhamento aumentam, os elementos que usam a teoria de placa espessa são capazes de levar a resultados melhores.

2.5 Ensaio de Carregamento em Placa

Segundo Girardello (2010) quando se avalia uma prova de carga em placa trata-se de uma reprodução, em modelo reduzido, de uma fundação superficial. Foi uma das primeiras aplicações dos ensaios *in situ* na tentativa empiricamente de obter informações sobre o comportamento e determinação das propriedades de deformação e de ruptura do solo.

De acordo com Terzaghi & Peck (1967), os dados do ensaio de carga em placa somente representam as características do solo até aproximadamente dois diâmetros abaixo da placa. Os resultados não podem ser extrapolados a maiores diâmetros quando a mesma solicita camadas de distintas características às do ensaio. Para evitar este problema deve-se conhecer o horizonte do solo do local em estudo.

Menegotto (2004) afirma que o ensaio de carga em placa constitui de uma compressão realizada diretamente na superfície do terreno por meio de uma placa metálica e rígida. O ensaio procura reproduzir o comportamento da fundação sob a ação das solicitações da estrutura.

2.6 O solo de Sinop-MT

De acordo com Brito (2017) o solo do município de Sinop-MT tem alta porcentagem de argila conforme as curvas granulométricas e em função da sua classificação pedológica, há uma predominância de Latossolos Vermelho – Amarela, de acordo com o mapa de solos do Brasil, disponibilizado pela Embrapa (2011).

Braga (2011) relata que o solo da região de Sinop-MT é formado por uma camada de argila siltosa mole ou silte argiloso até a profundidade de 13 m, em algumas

regiões da cidade encontra-se uma camada de cascalho com aproximadamente 1 m, seguida de uma camada de silte arenoso ou areia siltosa até 30 m.

O valor de rigidez do solo de Sinop-MT a partir do ensaio de prova de carga foi feito utilizando uma placa de aço circular com 0,08 m de espessura e 0,80 m de diâmetro, resultando em uma área de contato com o solo de 0,50 m². O local do ensaio foi no campus da Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT. Os resultados foram curvas de tensão x recalque para a região do centro e da borda da placa, porém para a análise do coeficiente de reação vertical do solo obteve-se uma curva média de duas regiões da placa resultando em um valor de 4.360 kN/m³ para uma recalque de 25 mm (SOUZA *et al*, 2014).

Para comparação de valores de coeficiente de reação vertical, Martins *et al* (2014) realizou o ensaio de prova de carga sobre sapata no solo de Sinop-MT no *campus* da Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT. A sapata utilizada no ensaio tinha dimensões de 1,15 m x 1,15 m x 0,30 m, e armadura com quatro barras com bitola 12,5 mm e dobras de 0,30 m, ligados por um pilar com dimensões 0,35 m x 0,35 m x 0,40 m. Na extremidade do pilar foram apoiados o macaco hidráulico e as vigas metálicas. A partir da curva tensão x recalque com recalque de 25,0 mm obteve-se o coeficiente de reação vertical de 6.383 kN/m³ (MARTINS *et al*, 2014).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a análise numérica do comportamento de placa em contato bilateral conforme a Figura 2a com o solo do município de Sinop-MT, foi utilizado o modelo das molas discretas, Figura 4, no contexto do método dos elementos finitos juntamente com um programa computacional.

3.1 Software computacional LISA

A simulação do comportamento da placa em contato com o solo foi feito no software livre LISA, que é um programa canadense desenvolvido pela empresa SONNENHOF HOLDINGS na versão 8.0.0. com um limite de 1.300 nós para simular.

No que diz respeito à análise estrutural, permite a simulação de um grande número de componentes estruturais, características de materiais e ações estáticas e dinâmicas. O programa pode estudar o comportamento de estruturas sujeitas a cargas variáveis no tempo.

O funcionamento do software segue três etapas principais:

- Construir o modelo diretamente no programa ao criar os nós para representar a forma do objeto;
- Resolver o modelo (definir o tipo de análise que se requer – estática linear, dinâmica, entre outros);
- Mostrar os resultados (abrir o arquivo de resultados e selecionar os parâmetros que deseja exibir, por exemplo deslocamento, tensão principal, entre outros).

O software LISA foi utilizado para obter os deslocamentos da placa após uma análise estática linear 3D considerando a interação entre o solo e a estrutura. Pelo método dos elementos finitos a placa foi discretizada em elementos bidimensionais e em seguida uma mola discreta foi inserida em cada ponto nodal para simular a interação com o solo.

3.2 Placa do tipo radier sobre base elástica

A placa estudada em concreto armado foi do tipo radier com dimensões de 12 m x 16 m x 0,40 m, módulo de elasticidade de 30 Gpa, coeficiente de Poisson de 0,20 e resistência à compressão característica (f_{ck}) de 35 MPa. Foram utilizados quatro carregamentos e definidos as distâncias conforme a Figura 9.

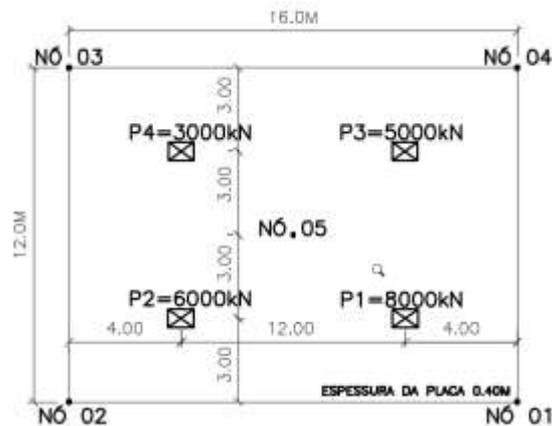


Figura 9 – Placa a ser estudada
Fonte: Acervo Pessoal, 2017

A partir do software foi obtido uma placa discretizada definindo-se a quantidade de elementos finitos bidimensionais, o tipo de material como isotrópico, assim como seus nós e conseqüentemente fazendo o carregamento de cargas pontuais em nós específicos, conforme a Figura 9. E em cada nó foi inserido um elemento de mola, definindo o coeficiente de rigidez da mola de acordo com a posição na placa, ou seja, nos nós de canto, de bordo e do meio da placa, de acordo com a Figura 10.

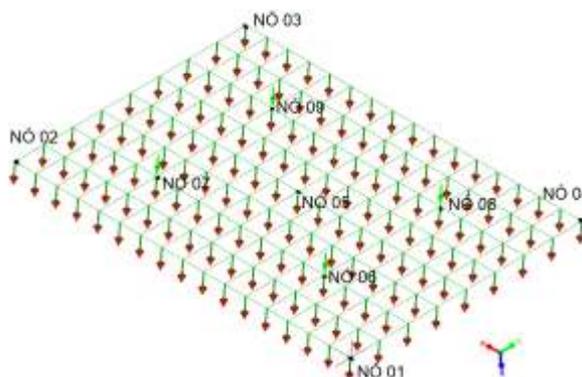


Figura 10 – Malha de elementos finitos
Fonte: Acervo Pessoal, 2017

A análise do comportamento da placa em contato com solo foi feita com malha de 16 elementos finitos, tendo cada um a dimensão de 4,0x3,0 m², 64 elementos finitos com dimensão de 2,0x1,5 m² e 128 elementos finitos com dimensão de 1,0x1,5 m².

3.3 Rigidez do solo

Na base elástica foram utilizados dois parâmetros de rigidez do solo de Sinop-MT: a) Segundo Souza *et al* (2014) foi de 4.360 kN/m³; b) De acordo com Martins *et al* (2014) foi de 6.383 kN/m³.

Para efeito de comparação foram utilizados outros valores típicos da literatura para obtenção desses dados: c) Velloso (2002), com a classificação do solo como sendo granular seco, foi de 10.000 kN/m³; d) Terzaghi (1955), solo mediantemente compactado, foi de 20.000 kN/m³; e) Bowles (1988), tendo o solo classificado como arenoso siltoso, foi de 25.000 kN/m³. Conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de rigidez do solo

Autor	K (kN/m ³)	Solo
Souza <i>et al</i> (2014)	4.360	Solo de Sinop-MT
Martins <i>et al</i> (2014)	6.383	Solo de Sinop-MT
Velloso (2002)	10.000	Granular Seco
Terzaghi (1955)	20.000	Arenoso Mediantemente Compactado
Bowles (1988)	25.000	Arenoso Siltoso

Fonte: Adaptado de SOUZA *et al*, MARTINS *et al* (2014), VELLOSO e LOPES (2002), BOWLES (1988) e TERZAGHI (1955)

Contudo, para esta pesquisa foram necessários fazer transformações nos parâmetros de rigidez do solo a fim de adaptar-se ao modelo de molas discretas, conforme as equações a seguir.

i) Para nós de canto da placa:

$$k_d = \frac{K \cdot A}{4 \cdot n} \quad (\text{Equação 4})$$

ii) Para nós de bordo da placa:

$$k_d = \frac{K \cdot A}{2 \cdot n} \quad (\text{Equação 5})$$

iii) Para nós do meio da placa:

$$k_d = \frac{K \cdot A}{n} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

k_d : parâmetro de rigidez do solo para base de molas discretas (kN/m);

K : parâmetro de rigidez do solo de estudos anteriores (kN/m³);

A : área total da placa (m²);

n: número de elementos finitos da placa.

Após as transformações feitas com os valores de K , foi realizado o lançamento no software LISA, discretizando a placa em 16, 64 e 128 elementos finitos. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

O carregamento estático das cargas foi definido com os seguintes valores $P1 = 8000$ kN, $P2 = 6000$ kN, $P3 = 5000$ kN e $P4 = 3000$ kN. Foram utilizados cinco valores para o parâmetro K .

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise dos resultados foram definidos pontos específicos e números de elementos da malha como mostram as Tabelas 2, 3, 4, 5, e 6 que apresentam os deslocamentos nos nós 01, 02, 03, 04 que representam pontos de canto da placa, e o nó 05 que representa o ponto de centro da estrutura e os nós 06, 07, 08, 09 que estão abaixo dos pontos de carregamento em decrescente cujo posicionamento na placa pode ser visto na Figura 9.

Tabela 2. Deslocamentos (mm) com o refinamento da placa

NÓ	16	64	128
	Elementos	Elementos	Elementos
K = 4.360 kN/m ³ (Souza <i>et al</i> 2014)			
01	47,28	44,87	44,16
02	39,47	38,40	37,46
03	25,23	25,31	24,69
04	33,04	31,77	31,39
05	59,65	55,79	54,72
06	71,32	75,00	76,37
07	59,37	62,54	63,22
08	55,63	58,80	60,06
09	43,67	46,34	46,91

Fonte: Acervo Pessoal, 2017

Tabela 3. Deslocamentos (mm) com o refinamento da placa

NÓ	16	64	128
	Elementos	Elementos	Elementos
K = 6.383 kN/m ³ (Martins <i>et al</i> 2014)			
01	30,20	26,94	26,06
02	25,63	23,88	22,86
03	16,49	16,54	15,95
04	21,05	19,60	19,15
05	40,54	37,41	36,46
06	50,91	54,64	56,02
07	41,65	44,94	45,67
08	38,66	41,99	43,24
09	29,40	32,30	32,89

Fonte: Acervo Pessoal, 2017

Tabela 4. Deslocamentos (mm) com o refinamento da placa

NÓ	16	64	128
	Elementos	Elementos	Elementos
K = 10.000 kN/m ³ (Velloso 2002)			
01	17,73	14,10	13,16
02	15,36	13,22	12,18
03	9,97	9,97	9,43
04	12,34	10,85	10,40
05	25,32	22,92	22,07
06	34,55	38,32	
07	27,72	31,06	
08	25,25	28,62	
09	18,42	21,36	

Fonte: Acervo Pessoal, 2017

Tabela 5. Deslocamentos (mm) com o refinamento da placa

NÓ	16	64	128
	Elementos	Elementos	Elementos
K = 20.000 kN/m ³ (Terzaghi 1955)			
01	7,66	4,49	3,63
02	6,80	4,79	3,84
03	4,48	4,39	3,99
04	5,35	4,10	3,77
05	11,69	10,20	9,50
06	19,34	23,01	24,35
07	15,14	18,34	19,08
08	13,21	16,33	17,50
09	9,01	11,66	12,23

Fonte: Acervo Pessoal, 2017

Tabela 6. Deslocamentos (mm) com o refinamento da placa

NÓ	16	64	128
	Elementos	Elementos	Elementos
K = 25.000 kN/m ³ (Bowles 1988)			
01	5,81	2,95	2,15
02	5,17	3,33	2,45
03	3,43	3,32	2,96
04	4,07	2,94	2,67
05	8,98	7,74	7,08
06	16,09	19,70	21,00
07	12,52	15,64	16,37
08	10,76	13,75	14,88
09	7,19	9,69	10,25

Fonte: Acervo Pessoal, 2017

As Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6 contêm uma primeira malha da placa com 16 elementos, uma intermediária com 64 elementos e uma última mais refinada com 128 elementos para modelagem do problema. Vale ressaltar que optou-se por essa divisão devido a simetria que o software LISA oferecia na modelagem da placa.

Como pode ser visto nas tabelas, tomando-se como base o nó de centro (nó 5), houve variação decrescente nos valores dos deslocamentos, ou seja, quanto melhor o refinamento da malha (mais elementos finitos tiver a placa) observou-se um menor deslocamento da estrutura em contato com o solo em estudo para todos os tipos de solos analisados.

As Tabelas 2 e 3, que tem como parâmetro de rigidez o solo para Sinop-MT, demonstram que para o estudo de Martins *et al* (2014) o coeficiente de rigidez do solo é aproximadamente 46% superior ao encontrado por Souza *et al* (2014), e que para o nó de centro (nó 05) da placa e um refinamento da malha com 128 elementos finitos, o valor de deslocamento da estrutura foi aproximadamente 33% inferior para a mesma área de estudo.

Nota-se que para os parâmetros de Sinop-MT há pouca variação de deslocamento quando aumenta o número de elementos de 64 para 128 sendo visto na região do nó central. Isso indica que a malha de intermediária de 64 elementos finitos apresenta um resultado satisfatório para esse modelo específico.

No estudo de Bowles (1988), ele obteve o parâmetro de rigidez para um solo siltoso arenoso, que é quase seis vezes maior que o parâmetro de rigidez do solo de Sinop-MT obtido por Souza *et al* (2014). Percebe-se que com essa diferença os deslocamentos são quase sete vezes menores. Esse resultado chama atenção para o comportamento do solo de Sinop-MT, que apresenta rigidez muito baixa, e reforça a importância em se estudar esse solo e sua interação com as estruturas.

A Figura 11 apresenta os deslocamentos em milímetros da placa no nó 01 que está localizado na região mais próxima do ponto de maior carregamento com 128 elementos finitos com os cinco coeficientes de rigidez do solo.

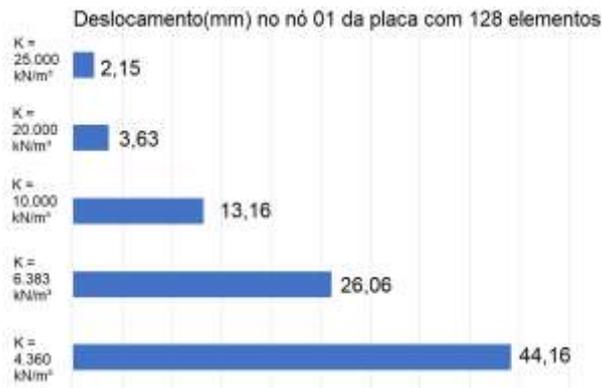


Figura 11 – Gráfico dos deslocamentos
Fonte: Acervo Pessoal, 2017

Como há variação significativa nos deslocamentos em função da rigidez do solo, é possível concluir que esse parâmetro é fundamental no estudo da interação solo e estrutura. Assim como as características físicas da placa podem influenciar nos resultados de deslocamento, tais como a espessura da placa, e o módulo de elasticidade do material.

Observou-se também que quanto maior o valor do parâmetro de rigidez do solo, menor são os deslocamentos, pois o solo é mais rígido, ou seja, tem uma capacidade de suporte mais elevada.

A Figura 12 demonstra os deslocamentos em milímetros da placa no nó de centro da placa com 128 elementos finitos com os cinco coeficientes de rigidez do solo.

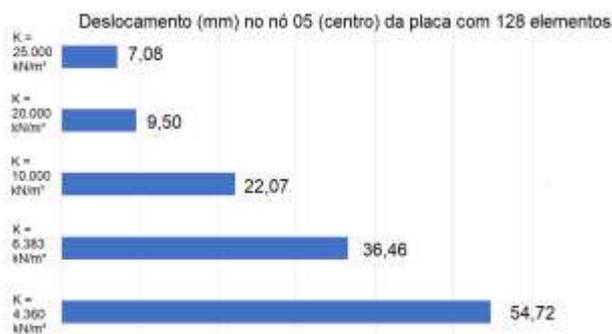


Figura 12 – Gráfico dos deslocamentos
Fonte: Acervo Pessoal, 2017

A Figura 13 apresenta os deslocamentos em função de diferentes tonalidades. As cores mais escuras representam os maiores deslocamentos e as mais neutras os menores deslocamentos.

Nota-se na placa duas áreas concentradas, ou seja, regiões de maiores deslocamentos. Isto está relacionado aos carregamentos serem os mais altos nesses pontos da estrutura, o que resulta em uma deformação mais acentuada.

Saber a localização e o comportamento da estrutura nas áreas mais deformadas são condições que devem ser levadas em consideração na elaboração de projetos estruturais.

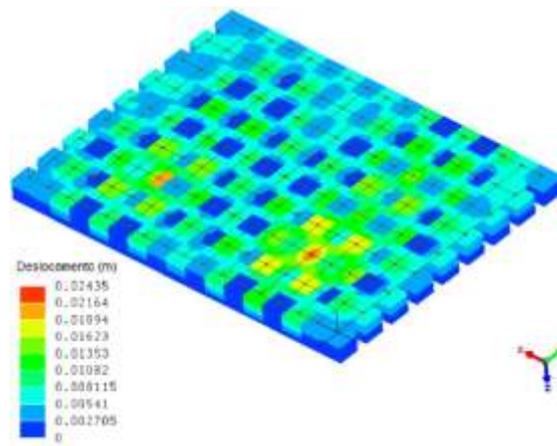


Figura 13 – Gráfico dos deslocamentos
Fonte: Acervo Pessoal, 2017

A Figura 13 foi obtida a partir do software LISA após delimitar todos os parâmetros de entrada e como resultado observou-se que na região em que teve o maior carregamento foi o de maior deslocamento. Para este caso foi utilizando malha de 128 elementos finitos e com a rigidez do solo de $K = 20.000 \text{ kN/m}^3$ (Terzaghi, 1955).

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou, de maneira geral, dados de deslocamento e da interação solo e estrutura a partir de um software de versão gratuita, o que demonstrou a capacidade do programa LISA em obter resultados positivos neste estudo.

Conclui-se que quanto mais refinada for a malha de elementos finitos bidimensionais para o estudo de placa obtém-se dados mais realísticos. Isso ocorre porque no modelo de molas discretas, utilizado para simular o contato com o solo, as molas são inseridas nos pontos nodais da estrutura. Logo, quanto mais refinada for a malha, mais se aproxima do real, onde toda a placa está em contato com o solo.

Quanto maior a rigidez do solo, melhor é a capacidade de suporte de carga desse material abaixo da estrutura e a placa apresenta menores deslocamentos. A placa do tipo radier demonstrou variação no seu deslocamento sob a influência da sua interação com solos de diferentes rigidez. Assim é possível afirmar que estes deslocamentos são muito influenciados por essa interação.

Os dados indicam que sempre é importante considerar o contato com o solo para os projetos estruturais, e quanto mais baixa a rigidez maior é a preocupação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONIAZZI, J. P. **Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120 – **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, nov. 1980.

_____. NBR 6489: **Projeto de carga direta sobre terreno de fundações**. Rio de Janeiro-RJ, 1984.

_____. NBR 6123 – **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, jun. 1988.

_____. NBR 8681 – **Ações e segurança nas estruturas – Procedimento**. Rio de Janeiro, mar. 2003.

BRAGA, E. **Análise da capacidade de carga de estacas hélice contínua e pré-moldada de concreto na região de Sinop-MT**. Sinop, 2011. 99 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Instituto de Ciências Exatas. Universidade do Estado de Mato Grosso. Campus Universitário de Sinop. Sinop, 2011.

BRITO, L. K. S. **Avaliação do Potencial de Erosão Natural e Acelerado do Ribeirão Nilza no Município de Sinop-MT**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Instituto de Ciências Exatas. Universidade do Estado de Mato Grosso. Campus Universitário de Sinop. Sinop, 2017.

BOWLES, J. E. **Foundation Analysis and Design**. 4. ed.. New York: McGraw-Hill, 1988.

CARVALHO, J. R. C. **Análise comparativa e de desempenho de elementos finitos de placa**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2004.

COLARES, G. M. **Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FERNANDES, G.R. **O método dos elementos de contorno aplicado à análise não linear de placas**. São Carlos. 178p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

GIRARDELLO, V. **Ensaio de placa em areia não saturada reforçada com fibras**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2010.

HOLANDA A. S. **Análise do equilíbrio de placas com restrições de contato**. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2000.

HOLANDA JR., O. G. **Interação solo-estrutura para edifícios de concreto armada sobre fundações diretas**, São Carlos. 191 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

KAMESWARA RAO, N.S.V. **Foundation design – theory and practice**. John Wiley & Sons. Singapura, 2011.

LISA - **BEGINNERS' GUIDE:GETTING STARTED WITH FEA. LISA Finite Element Analysis, Software Version 8.0.0**. 2013. Disponível em <http://www.lisa-fet.com/>. Acesso em 16 jan 2017.

MACHADO, F. C. S. **Análise computacional via MDF de cascas cilíndricas com restrições bilaterais e unilaterais de contato**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2013.

MACIEL, F.P. **Equilíbrio e Estabilidade de Elementos Estruturais com Restrições Bilaterais Impostas por Bases Elásticas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil, 2012.

MARTINS, L. C. C.; LEÃO E. B.; CRISPIM, F. A.; BENATTI, J. C. **Prova de carga em sapata isolada no município de Sinop - MT**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas. Universidade do Estado de Mato Grosso. Campus Universitário de Sinop. Sinop-MT, 2014.

MENEGOTTO, M. L. **Previsão da curva tensão recalque de ensaios de placa em solo não saturado**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. 2004.

PASTERNAK, P. L.. **On a New Method Analysis of an Elastic Foundation by Means of Two Foundation Constants**. Gousuedarstvennoe Izadatesvo Literaturi po Stroitelstvuri Arkhitecture, 1954.

ROSAS, L. R. B. **Análise dinâmica de sistemas estruturais reticulados com restrições de contato**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais. 2016

SOUZA, R. M. **O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor**. Universidade Federal de Belém. Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Civil. Núcleo de Instrumentação e Computação aplicada à Engenharia. Belém-PA. 2013.

SOUZA, S ; LEÃO E. B.; CRISPIM, F. A.; BENATTI, J. C.. **Ensaio de prova de carga sobre placa em Sinop-MT**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas. Universidade do Estado de Mato Grosso. Campus Universitário de Sinop. Sinop-MT, 2014.

TERZAGHI, K. **Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction**. Geotechnique, Washington, v. 5, n. 4, p. 297-326, 1955.

TERZAGHI, K.; PECK, R.B. **Soil mechanics in engineering practice**. 2 ed. New York: John Wiley and Sons, 1967.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R.. **Fundações - Critérios de Projeto, Investigações do**

Subsolo e fundações superficiais. 3. ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2002. v. 1.

WAIDEMAM, L. **Formulação do método dos elementos de contorno para placas enrijecidas considerando-se não-linearidades física e geométrica.** 2008. 239 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

WINKLER, E. **Die Lehre Von der Elasticitaet und Festigkeit.** Prag, Dominucus., 1867.