

ANÁLISE NUMÉRICA 2D DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS EM CONTATO BILATERAL COM O SOLO DO MUNICÍPIO DE SINOP-MT

ADRIANA NUNES DE SOUZA RODRIGUES¹
LETÍCIA REIS BATISTA ROSAS²
BRUNO RODRIGUES DOS SANTOS²

RESUMO: O município de Sinop-MT destaca-se como um dos mais importantes do estado, e se desenvolve com construções horizontais e verticais. Considerando esse desenvolvimento na área da construção civil, é de grande importância o devido conhecimento sobre o comportamento do seu solo em contato com estruturas. Neste trabalho, o estudo da interação solo-estrutura foi feito utilizando um modelo de molas discretas posicionadas na região de contato. Foram utilizados os parâmetros de dois solos já estudados no município de Sinop. Todas as análises foram feitas por meio de programa computacional, software LISA 8.0.0, baseado no Método dos Elementos Finitos. Foram analisados os deslocamentos da estrutura com e sem a interação com o solo, para avaliar a influência desse contato. Realizou-se também a análise da malha de elementos finitos, para verificar como o seu refinamento influencia na resposta. Os resultados foram satisfatórios, confirmando a viabilidade da utilização do software LISA aplicado à análise de estruturas em contato com o solo. Além disso, verificou-se que estruturas em contato com o solo de Sinop apresentam deslocamentos maiores em comparação com solos mais rígidos, devido à baixa capacidade de suporte do solo dessa região.

PALAVRAS-CHAVE: Interação solo-estrutura; método dos elementos finitos (MEF); coeficiente de reação vertical; solo de Sinop-MT; modelo de molas discretas.

2D NUMERICAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF STRUCTURES IN BILATERAL CONTACT WITH THE SOIL OF THE MUNICIPALITY OF SINOP-MT

ABSTRACT: The municipality of Sinop-MT stands out as one of the most important in the state, and develops with horizontal and vertical constructions. Considering this development in the area of civil construction, it is of great importance due to the knowledge about the behavior of its soil in contact with structures. In this work, the study

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

of soil-structure interaction was done using a model of discrete springs positioned in the contact region. The parameters of two soils already studied in the municipality of Sinop were used. All analyzes were performed using a computer program, LISA 8.0.0 software, based on the Finite Element Method. The structure displacements with and without interaction with the soil were analyzed to evaluate the influence of this contact. The analysis of the finite element mesh was also carried out to verify how its refinement influences the response. The results were satisfactory, confirming the feasibility of using the LISA software applied to the analysis of structures in contact with the soil. In addition, it was found that Sinop soil-contact structures show higher displacements compared to more rigid soils due to the low soil support capacity of this region. displacements compared to more rigid soils due to the low soil support capacity of this region.

KEYWORDS: *Soil-structure interaction; finite element method (MEF); coefficient of vertical reaction; Sinop-MT soil; model of discrete springs.*

1. INTRODUÇÃO

O solo do município de Sinop-MT é considerado um solo de pouca resistência, (SIMIONI,2011) e o seu comportamento ainda é pouco conhecido, assim como sua interação com estruturas, e em muitos casos, essas estruturas se apoiam no solo ou estão em contato com ele, durante toda sua vida útil. Por isso é importante estudar a interação entre o solo deste município com estruturas planas.

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.

Antigamente, a deformabilidade do solo não era levada em conta no dimensionamento das estruturas, pois, pela quantidade de cálculos era impossível de serem realizados manualmente. Sendo assim, o engenheiro era induzido a trabalhar com uma análise limitada. Com o passar dos anos e o avanço da tecnologia dos softwares computacionais, esperava-se uma mudança significativa desse quadro, contudo, mesmo com a popularização do cálculo de estruturas por meio de métodos numéricos, ainda se percebe que muitos engenheiros seguem a hipótese de solo rígido.

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

A condução de uma análise aproximada a realidade física, que leva em consideração a deformabilidade do solo, foi efetuada neste trabalho. Esta análise é chamada de interação entre o solo e a estrutura, e para esta análise foi utilizado software LISA 8.0.0 que

têm sua base de funcionamento o método dos elementos finitos, juntamente com o modelo de molas discretas dispostas ao longo de uma região de contato, e analisando-se por fim, o comportamento do solo com a estrutura e seus deslocamentos.

A análise numérica do comportamento de pórticos planos em contato com o solo de Sinop-MT colabora com dados e especificações relacionados ao conhecimento

do comportamento do solo com estruturas, e o comportamento das estruturas com os solos em estudo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Interação entre o solo e a estrutura

O contato entre o solo e a estrutura é algo muito comum de ser ver em obras civis da engenharia, como por exemplo, o contato em estruturas de fundações, túneis, etc. A figura 1 mostra alguns exemplos.



Figura 1: Exemplos de estruturas em contato com o solo. Fonte: Rosas (2016).

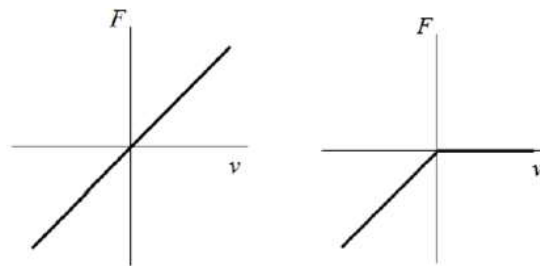
Apesar do avanço das tecnologias dos softwares e dos métodos de análises, uma das maiores dificuldades quando se trata de projetos estruturais, principalmente relacionados a estruturas de fundações, é analisar o comportamento do solo com a estrutura. E com a finalidade de melhorar as estruturas de fundações, muito se tem feito para que possamos ter avanços significativos com relação a sua modelagem, e um desses avanços é simulação da interação entre o solo e a estrutura. O estudo de tal interação é de elevada importância pelo fato da alta dificuldade que se tem em representar tanto o comportamento do solo, quanto o da estrutura (ROSAS, 2016).

De acordo com Scarlat (1993), do ponto de vista teórico, o método mais preciso para se considerar a deformabilidade do solo é por meio de uma análise iterativa tridimensional, na qual o solo e a estrutura são idealizados como um sistema único. No entanto neste trabalho foi utilizado o modelo de molas discretas por ser considerado um modelo mais simples e por ser compatível com o software computacional utilizado que trabalha com este modelo.

2.2 Contato bilateral e unilateral

A interação entre solo e estrutura pode ser definida como bilateral ou unilateral. No caso onde o solo reage tanto às solicitações de tração quanto às de compressão, o contato é denominado como bilateral, e no caso onde o solo reage apenas às solicitações de compressão, o contato é denominado unilateral (Silva, 1998).

No caso do contato bilateral, admite-se que o meio de contato trabalha integralmente com a estrutura, ou seja, a região de contato entre os corpos é conhecida a priori, uma vez que não acontecerá a perda de contato. Já no caso unilateral, a definição da região de contato entre os corpos vai depender da configuração deformada da estrutura, para uma determinada solicitação. Sendo assim, mesmo considerando a hipótese de pequenos deslocamentos e material elástico, o problema será não linear no caso unilateral (ROSAS, 2016).



a) Fundação linear bilateal b) Fundação linear unilateral

Figura 2: Relação força-deslocamento da fundação.

Fonte: Rosas (2016)

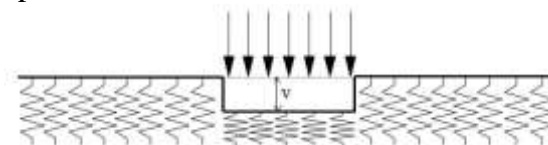
2.3 Modelos de bases elásticas

Como vimos, o real comportamento do solo é algo de difícil descrição, e a fim de se melhorar essa problemática, vários modelos matemáticos foram elaborados visando representá-lo da melhor forma possível. Quando a atenção ou interesse da resposta da base elástica é voltado apenas para a região de contato entre os corpos, é possível utilizar modelos mais simples para representá-la (Silva, 1998).

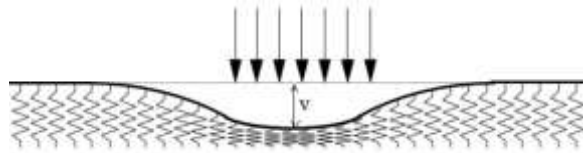
No trabalho de Silva (1998) é apresentada uma reunião dos modelos mais comuns de meios elásticos, que são utilizados para mostrar o comportamento do solo durante processo de carregamento da estrutura. Dentre estes, os modelos mais simples são aqueles que utilizam apenas um parâmetro, que define as propriedades do material da fundação elástica. Dentre esses modelos, destacam-se o de molas discretas dispostas ao longo da região de contato e que são ligadas, no contexto do método dos elementos finitos, aos pontos nodais da estrutura (PEREIRA, 2003; MACIEL, 2012) e o modelo de Winkler que é disposto de uma camada formada por molas estreitamente espaçadas e independentes entre elas (MACIEL, 2012; ROSAS, 2016).

Conforme Silva (1998), tanto o modelo de molas discretas, como o modelo de Winkler não consideram a interação entre as molas, e por esse motivo, eles não representam o real comportamento de algumas situações. De acordo com Winkler (Winkler, 1867), uma carga atuando em dado ponto da fundação causa deflexão apenas nesse ponto, como mostra a figura 3.a. Entretanto, o solo é, na realidade, um corpo contínuo e, portanto, uma curva de deflexão deve ser obtida (figura 3.b).

Já os modelos de dois parâmetros como o de Pasternak (Pasternak, 1954), consideram de alguma forma a interação entre as molas, melhorando, os modelos que consideram apenas um parâmetro, como o de Winkler.



a) Modelo de um parâmetro (Winkler e molas discretas)



b) Modelo com dois parâmetros

Figura 3: - Curvas de deslocamento da base elástica.
Fonte: Rosas (2016).

Os modelos de bases elásticas com um e dois parâmetros descritos nesta seção, são detalhados a seguir, dando ênfase ao modelo de molas discretas, que será utilizado nesta pesquisa.

2.3.1 Modelo de molas discretas

Scarlat (1993) relata que uma maneira simplificada de quantificar o efeito da deformabilidade dos solos, consiste em considerar uma série de molas discretas sob a base da fundação. Para esse modelo de base elástica de um parâmetro, constituído por molas dispostas ao longo da região de contato, para a reação da base elástica, têm-se a seguinte expressão:

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

Onde:

k_d = parâmetro de rigidez da mola (dado em unidade de força por comprimento);

r_b = reação base elástica;

v_b = deslocamento da base;

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

A Figura 4 mostra uma viga apoiada sobre uma fundação do modelo de molas discretas.

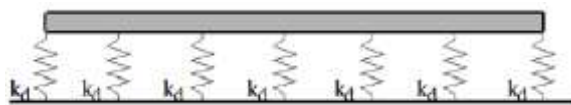


Figura 4: - Modelo de molas discretas representando o solo.
Fonte: Rosas (2016).

2.3.2 Modelo de winkler

Para o modelo de Winkler (WINKLER, 1867) a região de contato é representada através de um sistema de molas estreitamente espaçadas e independentes entre si (Figura 5). Nesse modelo, a reação exercida em um dado ponto da região de contato é proporcional ao deslocamento vertical da estrutura nesse mesmo ponto, e pode ser expressa por:

$$r_b = k_l v_b \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

k_d = parâmetro de rigidez da mola (dado em unidade de força por área);

r_b = reação base elástica;

v_b = deslocamento da base;

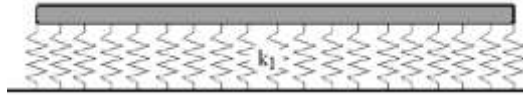


Figura 5: - Modelo de Winkler representando a região de contato.

Fonte: Rosas (2016).

2.3.3 Modelo de Pasternak

O modelo de dois parâmetros de Pasternak (PASTERNAK, 1954) é o modelo que leva em consideração a interação entre as molas, e também considera que as mesmas são interligadas por uma camada incompressível.

$$r_b = k_I v_b - G \nabla^2 v_b \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

r_b = reação base elástica;

v_b = deslocamento da base;

k_I = parâmetro de rigidez da mola (dado em unidade de força por área);

G = parâmetro de rigidez cisalhante da camada.

2.4 Solo de Sinop-MT

De acordo com Sanches Brito e Dalla Roza (2017), o solo de Sinop-MT, foi classificado como argiloso de baixa plasticidade, apresentando resultados distintos no ensaio de sedimentação com e sem defloculante. Solos com essa característica classificam-se pela AASHTO como sofrível a mau como comportamento de subleito.

Em estudos feitos por Braga e Crispim (2011) utilizando os dados de SPT fornecidos por empresas da região o solo do município de Sinop-MT é formado por uma camada de argila siltosa mole ou silte argiloso até a profundidade aproximada de 13 metros, em algumas regiões da cidade encontra-se uma camada de cascalho com aproximadamente 1 metro, seguida de uma camada de silte arenoso ou areia siltosa até o limite prospectado, em torno de 30 metros. A divergência entre as classificações de Braga e Crispim (2011) e Sanches Brito e Dalla Roza (2017) se deu pela não utilização do defloculante no ensaio de sedimentação.

Para realizar este trabalho foi necessário definir o coeficiente de reação vertical para o solo do município de Sinop - MT. Essa definição foi realizada através do ensaio de prova de carga em placa, que foi feito no município de Sinop-MT, no campus da Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT, no trabalho de Souza *et al* (2014). A placa utilizada no ensaio possui formato circular, confeccionada em aço, 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 ensaio foi finalizado levando-se em consideração o critério dos recalques máximos admissíveis para o ensaio (25,0 mm), conforme ABNT (1984). O coeficiente de reação vertical foi obtido através da relação tensão x recalque. O coeficiente de reação vertical médio obtido no ensaio de prova de carga sobre placa em Sinop – MT, foi de 4.360 kN/m³, (Souza *et al*, 2014) .

Outro valor analisado neste trabalho foi o coeficiente de reação vertical encontrado no trabalho de Martins *et al* (2014). O trabalho de Martins *et al* (2014), consistiu na realização de prova de carga em sapata isolada no município de Sinop – MT, no campus da Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT. Vale ressaltar que a tensão admissível foi calculada, assim como no trabalho de Souza *et al* (2014), também considerando-se um recalque máximo admissível de 25 mm. Contudo, o valor da tensão admissível obtido é de aproximadamente 38% superior ao encontrado por Souza *et al* (2014), e conseqüentemente, o ensaio de Martins *et al* (2014) obteve um valor de coeficiente de reação vertical quase 50% maior que no trabalho de Souza *et al* (2014), mesmo os dois ensaios sendo realizados na mesma região de estudo. O coeficiente de reação vertical encontrado com base nos dados de Martins *et al* (2014) é igual a 6.383 kN/m³.

2.5 Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método matemático de análise numérica, que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mas mantendo as propriedades originais.

Conforme Souza (2003), vários tipos de elementos finitos já foram desenvolvidos e apresentam formas geométricas diversas, como por exemplo, elemento de barra, triangular, quadrilateral, cúbico, etc., e essa forma se dá em função do tipo e da dimensão do problema, se o mesmo é unidimensional, bidimensional, ou tridimensional.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é bastante utilizado pra analisar vários problemas de engenharia, com ele é possível se ter o estudo dos deslocamentos e das tensões nas mais diversas estruturas. O método também é utilizado em outras análises de engenharia, como por exemplo, adensamento, pressão neutra, entre outros. Mas o que se tem de comum entre todas essas análises mencionadas é que a solução destas é dada através de equações diferenciais parciais que relaciona variáveis dentro de um certo domínio, tendo que obedecer condições de restrições para as variáveis fundamentais e suas derivadas na fronteira do domínio (MARTHA, 1994).

O MEF pode ser interpretado como uma generalização dos procedimentos adotados em uma análise estrutural convencional de sistemas reticulados. De fato, a formulação matricial pelo Método dos deslocamentos de estruturas aperticadas é o próprio MEF na sua formulação em deslocamentos. A diferença básica entre a análise de pórticos e o MEF está no próprio modelo estrutural (MARTHA, 1994). A Figura 6 apresenta a geometria de vários tipos de elementos finitos e seus pontos nodais.

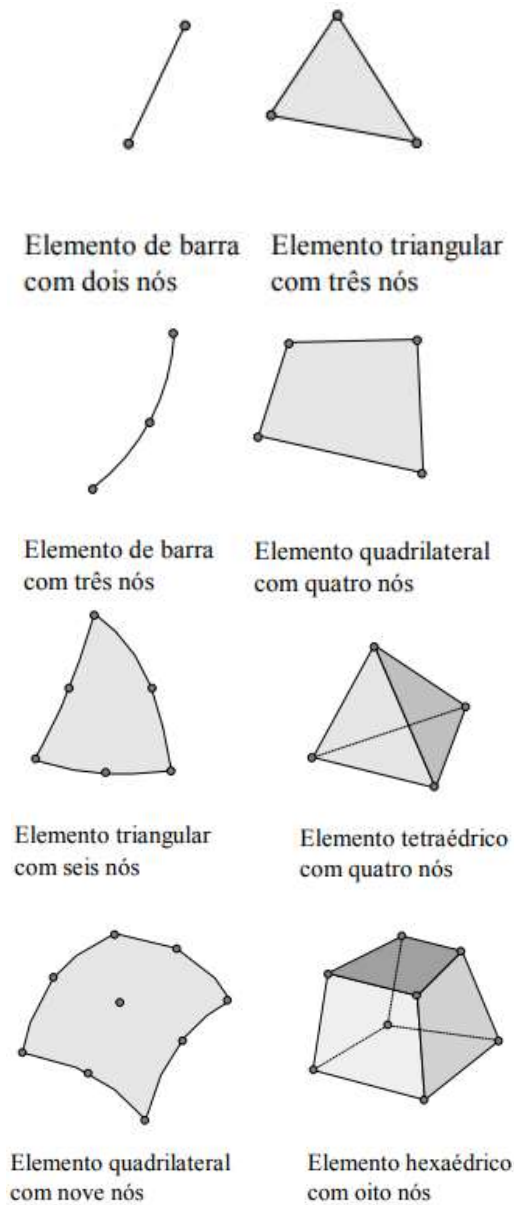


Figura 6: - Diferentes tipos malhas de elementos finitos.
Fonte: Souza (2003).

Ao utilizar o MEF em conjunto com o modelo de molas discretas para representar o comportamento do solo com a estrutura, discretiza - se o elemento estrutural em várias partes. Em cada ponto nodal é considerado a presença de uma mola que simula a interação com o solo, como mostra a figura 7, em que se tem um elemento de barra que é considerado o mais simples para se fazer a modelagem da estrutura.

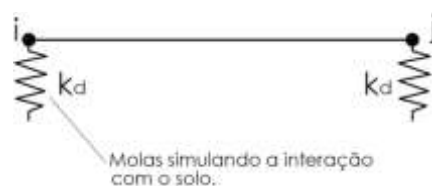


Figura 7: Elemento de barra com molas que simulam a interação com o solo.

Fonte: Autoria própria (2017).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho se utilizou o modelo de molas discretas, considerando o contato bilateral no contexto do MEF, utilizando-se de ferramenta computacional para lançamento da estrutura.

3.1 Coeficiente de reação vertical

Os parâmetros de rigidez do solo k_d obtidos para ambos os coeficientes de Martins *et al* (2014), no valor de 6.383 kN/m³ e de Souza *et al* (2014), de 4.360 kN/m³, foram obtidos conforme mostra a equação 4, obtendo-se assim um valor de parâmetro de rigidez do solo em unidade de força por comprimento necessária para aplicação do modelo de molas discretas.

$$k_d = \frac{K.L.b}{n_{ef}} \quad (\text{Equação 4})$$

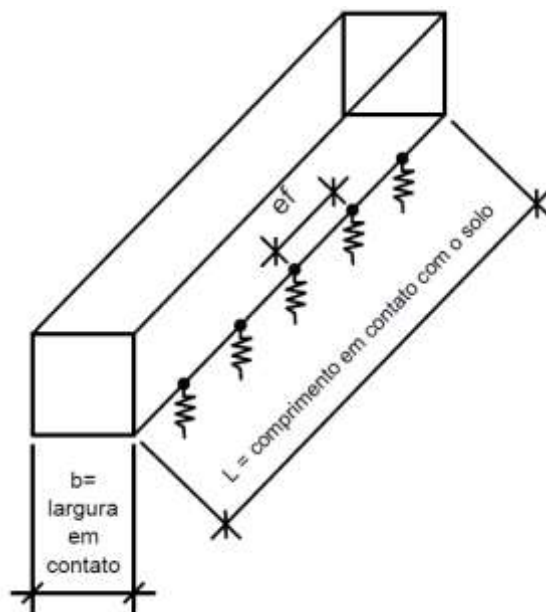


Figura 8: Viga em 3D.
Fonte: Autoria própria (2017).

Onde:

k_d = parâmetro de rigidez da mola (dado em unidade de força por comprimento);

K = coeficiente de reação vertical (dado em unidade de força por volume);

L = comprimento em contato com o solo;

b = largura da seção em contato com o solo;

n_{ef} = número de elementos finitos.

3.2 Software Lisa 8.0.0

Para analisar o comportamento de uma estrutura apoiada será realizada a simulação no software LISA, que é um software canadense desenvolvido pela empresa SONNENHOF HOLDINGS, onde a versão atual é a 8.0.0. O LISA tem sua aplicabilidade direta a problemas de Engenharia Civil, especificamente na área de estruturas, acústica, térmica e hidráulica. No que diz respeito à análise estrutural, permite a simulação fácil e imediata de um grande número de componentes estruturais, características de materiais e ações estáticas e dinâmicas (LISA, 2013).

O software LISA tem uma versão gratuita, idêntica à paga, mas com um limite de 1.300 nós para simular. A licença é perpétua e nunca expira. O programa tem três etapas principais:

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

A análise estática linear determina o estado de deformação e tensões em uma estrutura, cujo material tem uma relação linear de tensão-deformação. Após o lançamento no software computacional foram analisados os deslocamentos das estruturas estudadas.

3.3 Análises das deformações

Após definir o parâmetro k_d das molas que representam o solo, foi feita a escolha de dois modelos de estruturas que estão em contato com o solo. Para a aplicação do método dos elementos finitos que trabalha em conjunto com o modelo de molas discretas, foi feita a modelagem dessas estruturas no software LISA. Após o lançamento da estrutura, as regiões em contato com o solo foram discretizadas em várias malhas de elementos finitos.

O cálculo para transformação do parâmetro K para unidade de força por comprimento foi feito, viabilizando a aplicação do modelo de molas discretas. Em seguida fez-se o lançamento das molas, onde em cada ponto nodal da estrutura em contato com o solo foi posicionada uma mola. Por fim, foram obtidos os deslocamentos da estrutura, com e sem as molas, para diferentes malhas de elementos finitos.

Após a obtenção das deformações da estrutura, foram comparados os resultados obtidos com o coeficiente de reação vertical de Souza *et al* (2014), e o coeficiente de reação vertical de Martins *et al* (2014).

A análise das deformações obtidas para o coeficiente de reação vertical igual a zero também foi feita, assim como a análise da influência da malha de elementos finitos na resposta. Os resultados foram organizados em tabelas e diagramas para análise das deformações e da interação solo-estrutura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Pórtico plano suportado por pilares em contato com o solo

Este pórtico foi analisado por Arboleda-Monsalve *et al.* (2008) e por Rosas (2016), considerando o mesmo mostrado na Figura 9.a, a estrutura é composta de seis membros: dois pilares de concreto (*ec* e *fd*) conectados por uma viga também de concreto (*cd*); e os membros *ab*, *ca* e *db* de aço estrutural perfil W14 x 26. Os pilares de concreto têm módulo de elasticidade $E = 25998.75$ MPa, e seção transversal circular de área $A = 0.7854$ m² e de diâmetro de 1m.

A viga de concreto possui módulo de elasticidade $E = 25998.75$ MPa, e seção transversal quadrada de 0.50×0.50 de área $A = 0.25$ m².

Os membros em aço estrutural apresentam área da seção transversal $A = 4.961 \times 10^{-3}$ m², módulo de elasticidade $E = 206842.72$ MPa, e densidade $\rho = 38.86$ kg/m. Todas as ligações entre os elementos são consideradas rígidas.

O coeficiente de reação vertical utilizado inicialmente é de 2.0684 MN/m². O solo foi representado através do modelo de molas discretas, com parâmetros de rigidez calculados conforme a equação 5.

O parâmetro de rigidez do solo k_d varia de acordo com o membro analisado e a quantidade de elementos finitos utilizados. O mesmo deve ser utilizado em unidade de força por comprimento.

$$k_d = \frac{K.L}{n_{ef}} \quad (\text{Equação 5})$$

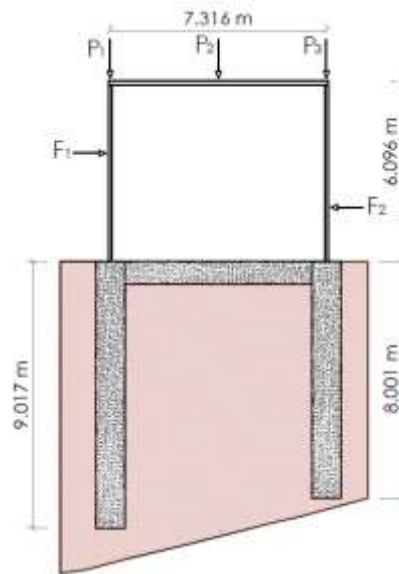
Onde:

K = coeficiente de reação vertical (dado em unidade de força por área);

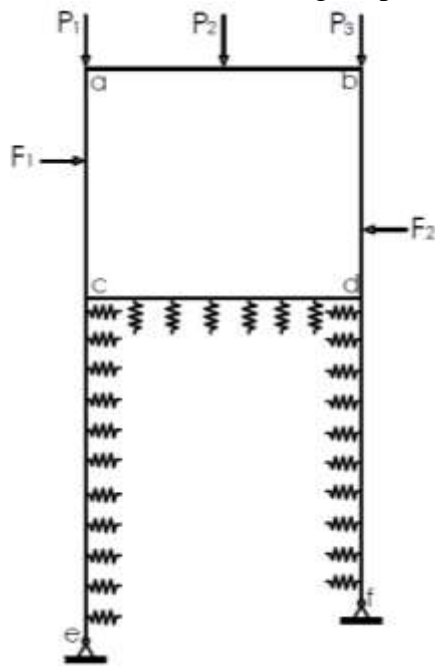
L = comprimento em contato com o solo;

n_{ef} = número de elementos finitos.

A Figura 9.b ilustra o modelo discreto utilizado, com disposição das molas que simulam a interação do solo com a estrutura. As mesmas estão dispostas ao longo das regiões de contato analisadas.



a) Dimensões e cargas aplicadas



b) Modelo discreto

Figura 9: Pórtico plano em contato com o solo. Fonte: Adaptado de Rosas (2016).

Após a definição dos parâmetros de rigidez do solo, conforme equação 5, os valores foram lançados no software Lisa versão 8.0.0, juntamente com as propriedades dos materiais já definidas anteriormente.

A Tabela 1 apresenta como resultados os valores dos deslocamentos horizontais e deslocamentos verticais nos nós a , b , c e d , causados pelos carregamentos estáticos aplicados ($P_1 = 943.023$ kN, $P_2 = 106.75$ kN, $P_3 = 943.023$ kN, $F_1 = 53.378$ kN e $F_2 = 26.689$ kN), e assumindo que as ligações desses nós são rígidas.

Cada membro que está em contato com o solo foi discretizado em 40 elementos finitos, e em cada ponto nodal foi inserido uma mola que simulou a interação do solo com o pórtico. Os membros citados em contato com o solo são os dois pilares de concreto (ec e fd) e a viga também de concreto (cd).

Os resultados obtidos foram comparados com os resultados de Arboleda-Monsalve *et al.* (2008) e com os resultados de Rosas (2016), que discretizou o pórtico em 6 elementos finitos (EFs) por membro e representou o solo através do modelo de Winkler.

Tabela 1. Deslocamentos (m) do pórtico plano ($K = 2.0684 \text{ MN/m}^2$).

Desloca-mentos		Rosas (2016)	Arboleda- Monsalve <i>et al.</i> (2008)	Presente Estudo
Horizontal	u_a	0,0214	0,0219	0,0218
	u_b	0,0212	0,0217	0,0216
	u_c	0,0028	0,0028	0,0029
	u_d	0,0028	0,0028	0,0029
Vertical	v_a	-0,0063	-0,0063	-0,0063
	v_b	-0,0064	-0,0064	-0,0064
	v_c	-0,0004	-0,0004	-0,0004
	v_d	-0,0004	-0,0004	-0,0003

Fonte: Arquivo pessoal (2017).

Como apresentado na tabela 1, os valores de deslocamentos para o pórtico do presente estudo na grande maioria dos pontos é igual ou próximo aos valores de deslocamentos encontrados por Arboleda-Monsalve (2008) e Rosas (2016), validando a modelagem deste trabalho.

Observa-se que a estrutura foi representada pelo modelo de Winkler por Rosas (2016), e que para se chegar no resultado apresentado acima, a estrutura foi dividida em 6 EFs por membro. No entanto no presente estudo para se chegar ao mesmo resultado foi necessário dividir cada membro da estrutura em 40 EFs, isso mostra que é possível atingir, utilizando molas discretas, exatamente o resultado do modelo de Winkler, necessitando para isso apenas o refinamento da malha em um numero maior de EFs.

O estudo do refinamento da malha de elementos finitos foi feito para o mesmo pórtico em questão, utilizando o mesmo coeficiente de reação vertical, $K = 2.0684 \text{ MN/m}^2$ e as propriedades dos materiais e dimensões da estrutura também já definidas anteriormente. O mesmo foi lançado no software Lisa e discretizado utilizando 2, 5, 20 e 40 elementos finitos para cada membro do pórtico que está em contato com o solo.

A transformação do valor de $K = 2.0684 \text{ MN/m}^2$, foi feita de acordo com a equação 5, obtendo-se um valor de parâmetro de rigidez do solo em unidade de força por comprimento, valor necessário para utilização do modelo de molas discretas. Os valores de deslocamentos das quatro malhas de EFs estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Refinamento da malha de elementos finitos para o pórtico plano ($k = 2.0684 \text{ MN/m}^2$).

Desloca-mento	40 EFs por membro
---------------	-------------------

		2 EFs por membro	5 EFs por membro	20 EFs por membro	
Horizontal	u_a	0,0248	0,0231	0,0221	0,0218
	u_b	0,0216	0,0229	0,0219	0,0216
	u_c	0,0062	0,0037	0,0031	0,0029
	u_d	0,0062	0,0037	0,0031	0,0029
Vertical	v_a	-0,0049	-0,0063	-0,0063	-0,0063
	v_b	-0,0050	-0,0064	-0,0064	-0,0064
	v_c	-0,0004	-0,0004	-0,0004	-0,0004
	v_d	-0,0004	-0,0004	-0,0003	-0,0003

Fonte: Arquivo pessoal (2017)

Pode-se observar na análise do refinamento da malha que quanto maior a quantidade de elementos finitos for inserido nos membros do pórtico, melhores são os resultados obtidos, pois cada vez mais se aproxima do modelo contínuo que é o solo totalmente em contato com a estrutura, como apresentado anteriormente no diagrama 2.

4.2 Viga biapoiada de concreto

O segundo problema é ilustrado na figura 10, trata-se de uma viga biapoiada em contato com o meio elástico. Possui seção retangular de 0.5×0.2 . módulo de elasticidade $E= 30$ GPA, coeficiente de *Poisson* = 0.3. Para o cálculo das cargas atuantes na viga, foi considerado uma parede de alvenaria de 3m de altura sobre a mesma com peso específico de 13 kN/m^3 , também foram considerados três cargas de 10.5 kN simulando pilares de concreto sobre a viga.

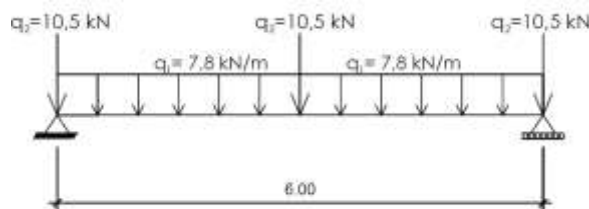


Figura 10: Viga biapoiada com carregamento atuante.

Fonte: Autoria própria (2017).

Para a viga biapoiada de 6m de comprimento, foi avaliado seu comportamento em contato com o solo do município de Sinop-MT utilizando ambos os parâmetros de solo de Souza *et al* (2014), de 4.360 kN/m^3 e de Martins *et al* (2014), de 6.383 kN/m^3 .

A viga também foi avaliada considerando o parâmetro de rigidez do solo igual a zero, ou seja, sem a consideração da interação entre o solo e a estrutura.

Outro valor utilizado para obtenção dos deslocamentos foi o coeficiente de reação vertical de Bowles (1988), classificado como siltoso arenoso, com valor de $K = 25000 \text{ kN/m}^3$.

As transformações dos valores de $K = 25000 \text{ kN/m}^3$ e dos coeficientes de Sinop-MT foram feitas de acordo com a equação 4, obtendo-se valor de parâmetros de rigidez do solo em unidade de força por comprimento, valor necessário para utilização do modelo de molas discretas. O resultado dos deslocamentos da viga para uma malha de 6 elementos finitos está apresentado na figura 11. Todos os deslocamentos apresentados foram obtidos considerando o nó central da viga, onde o deslocamento é maior.

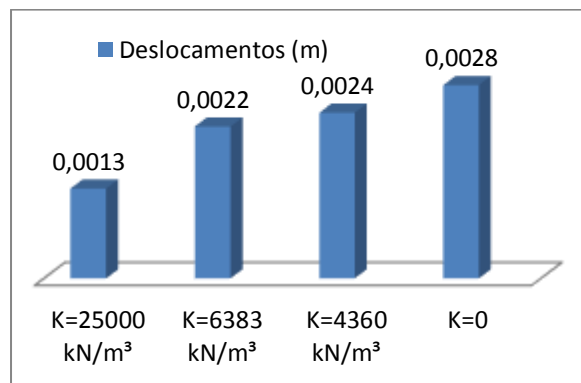


Figura 11. Deslocamentos (m) da viga biapoiada para uma malha de 6 Efs.
Fonte: A autoria própria (2017).

Como podemos observar no diagrama, quanto maior o coeficiente de reação vertical K da base elástica, menores são os deslocamentos na viga, e na análise do solo de Sinop-MT percebe-se que o mesmo apresentou valores de deslocamentos maiores, e isso se deve a baixa capacidade suporte do solo deste município.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se a análise de sistemas estruturais apoiados em contato com o solo. Foi dada atenção particular para o solo do Município de Sinop-MT, por ser um solo de baixa capacidade de suporte, e devido a essa característica observou-se que estruturas em contato com o mesmo possuem deslocamentos maiores do que estruturas que estão apoiadas em solos com de maior resistência. Foram determinados os deslocamentos de um pórtico e de uma viga de concreto.

Todas as análises foram feitas através do programa computacional LISA. O programa é baseado no método dos elementos finitos. O solo foi modelado de acordo com o modelo numérico de molas discretas, onde as molas são dispostas ao longo da região de contato.

Pôde-se observar que quanto mais refinada for a malha de elementos finitos, ou seja, quanto maior a quantidade de elementos utilizados na análise, melhores são os resultados obtidos. Isso ocorre porque quando o solo é representado pelo modelo de molas discretas, as molas são inseridas nos pontos nodais. Por isso, quando menor a quantidade de elementos, e conseqüentemente de nós, menos pontos em contato com o solo são considerados. Ao refinar a malha em mais elementos, o modelo aproxima-se do

comportamento real, onde o contato ocorre contínuo em toda a barra, e assim obtém-se melhores resultados.

Quando o parâmetro de rigidez do solo utilizado na análise é igual a zero, não se leva em consideração a interação do solo com a estrutura, e os valores de deslocamentos gerados são consideravelmente altos. Isso mostra a influência que o contato como o solo exerce na resposta da estrutura deformada.

No entanto, quando as estruturas são lançadas considerando a interação do solo com a estrutura, ou seja, com parâmetro de rigidez diferente de zero, percebe-se que esses deslocamentos diminuem. Perante esses resultados conclui-se que quanto maior for o parâmetro de rigidez do solo, menores serão os deslocamentos obtidos na estrutura, reforçando a importância de se considerar a interação que há entre o solo e estruturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARBOLEDA-MONSALVE, L.G.; ZAPATA-MEDINA, D.G.; ARISTIZABAL-OCHOA, J.D., 2008. **Timoshenko beam-column with generalized end conditions on elastic foundation: Dynamic-stiffness matrix and load vector.** Journal of Sound and Vibration, v.310, pp. 1057-1079.

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

BRAGA, E.; CRISPIM, F. A. *Análise da capacidade de carga de estacas hélice contínua e pré-moldada de concreto na região de Sinop-MT*, 2011. 9 p. Monografia (Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil) Faculdade de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop.

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.

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.

LISA - **BEGINNERS' GUIDE:GETTING STARTED WITH FEA.** LISA Finite Element Analysis, Software Version 8.0.0. 2013.

MACIEL, F.P., 2012. **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

MARTHA, L. F., Notas de aula do Curso, CIV 2118 – **Método dos Elementos Finitos.** Pontífica universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio,1994.

MARTINS, L. C.C.; LEÃO E. B.; CRISPIM, F. A.; BENATTI, J. C. **Prova de Carga em Sapata Isolada no município de Sinop-MT,** Sinop-MT, 2014. 9 p. Monografia

(Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil) Faculdade de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop.

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

PEREIRA, W.L.A., 2003. **Formulações numéricas para análise de vigas em contato com bases elásticas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

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.

SANCHES BRITO, L.; DALLA ROZA, A. E. **Avaliação do Potencial de Erosão Natural e Acelerado do Ribeirão Nilza no Município de Sinop-MT**, 2017. 9 p. Monografia (Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil) Faculdade de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop.

SCARLAT, A.S. **Effect of soil deformability on rigidity: related aspects of multistory buildings analysis**. ACI Struct. J., Detroit, v. 90, n. 2, 1993.

SILVA, A.R.D., 1998. **Análise de placas com restrições de contato**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

SOUZA, Remo Magalhães. **O problema dos elementos finitos aplicado a condução de calor**. Material Didático. Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

SOUZA, S.; LEÃO E. B.; CRISPIM, F. A.; BENATTI, J. C. **Ensaio de prova de carga em placa em Sinop-MT, Sinop-MT, 2014. 9 p**. Monografia (Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil) Faculdade de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop.