

## ANÁLISE ESTRUTURAL DE PISOS INDUSTRIAIS UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Porto B. Thiago<sup>a</sup>, Mendonça Q. Beatriz<sup>b</sup>, Carvalho S. G. Lucas<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Avenida Antônio Carlos 6627, Belo Horizonte, Brasil, <http://www.ufmg.br>*

<sup>b</sup>*Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Avenida Amazonas 5253, Belo Horizonte, Brasil, <http://www.cefetmg.br>*

**Palavras Chave:** Análise Estrutural, Pisos industriais e Métodos dos Elementos Finitos.

**Resumo.** Em projetos industriais de Minas e Usinas é muito comum o cálculo de pisos submetidos a carregamento de veículos pesados (na ordem de 2500 KN). Lavador de Veículos Pesados, Posto de Abastecimento e Oficinas de Manutenção são alguns exemplos. Um piso mal dimensionado pode ocasionar fissuras e/ou trincas indesejadas no radier. Sabendo-se disso, torna-se necessário avaliar a qualidade dos procedimentos convencionais para análise de piso em relação a métodos mais rigorosos. Este trabalho faz um estudo dos métodos existentes para representação do sistema geotécnico (solo) com o objetivo de avaliar a precisão de métodos simplificados em relação a métodos mais rigorosos, do ponto de vista teórico. Dois estudos de caso são abordados neste trabalho. Para a modelagem numérica em Modelo de Elementos Finitos (MEF) foi utilizado o software SAP 2000 V.14. Recalques diferenciais, Tensões Máximas, Momentos Fletores e Esforços Cortantes atuantes foram objetos de estudo para os modelos de solos analisados.

## 1 INTRODUÇÃO

Os pisos são elementos de muita importância dentro das plantas industriais, pois são sobre eles que as atividades produtivas acontecem, sendo que devem resistir e distribuir os esforços verticais provenientes de cargas e equipamentos. Por estarem submetidos a situações diversas, seu estudo é de grande relevância para a execução de um projeto consistente, dentro de parâmetros rigorosos de qualidade.

O Brasil é um dos países líderes no dimensionamento de pavimentos, pois possui domínio da evolução tecnológica dos materiais e alto grau de especialização dos profissionais das áreas de projeto e execução (Rodrigues et al, 2006). Neste contexto, os modelos de análise de cálculo estrutural que focam na interação do solo com a estrutura ganham espaço em discussões acadêmicas e também dentro dos escritórios de projeto.

De acordo com Scarlat (1993), do ponto de vista teórico, o mais preciso método para se considerar a deformabilidade do solo é uma análise interativa tridimensional, na qual o solo e a estrutura são idealizados como um sistema único. Nesse tipo de análise, o solo é considerado até os limites em que os efeitos de tensão possam ser desprezados e, neste caso, a existência de apoios para os limites não teria efeito algum sobre a resposta da Interação Solo e Estrutura (ISE).

Porém, o modelo de Winkler, que representa o meio solo como um conjunto de molas, é o mais utilizado no estudo da ISE nos escritórios de projeto. (Porto, 2010)

O objetivo desse trabalho é comparar os resultados obtidos desses dois modelos na realização do dimensionamento de pisos para postos de abastecimento em uma planta industrial de mineração, verificando suas diferenças e suas aplicabilidades.

## 2 PISOS INDUSTRIAIS



Figura 1: Piso Industrial (<http://www.pisosindustriais.com.br>)

O piso industrial pode ser definido como elemento estrutural que deve servir como base para os equipamentos que se apoiam em sua superfície, resistindo e distribuindo as tensões impostas na camada de solo situada abaixo.

De modo a cumprir corretamente com sua função, o piso industrial deve ser dimensionamento adequadamente. Para tanto, uma caracterização prévia do solo no qual ele se

apoiará deve ser realizada e oferecer as informações geotécnicas necessárias para o início do projeto, as quais possibilitarão determinar principalmente sua capacidade de resistência. Paralelamente a esta análise, as situações de carregamento existentes, e as formas de utilização da estrutura devem ser estudadas, fazendo com que seja possível dessa forma encontrar a solução que oferece o maior custo-benefício, e a definição de parâmetros importantes, como o traço do concreto utilizado, e o tipo de pavimento. Dessa forma, os pisos podem ser feitos de concreto armado, simples ou protendido, e até mesmo contarem com a adição de fibras. A Figura 2 abaixo mostra cortes esquemáticos de alguns desses pisos.

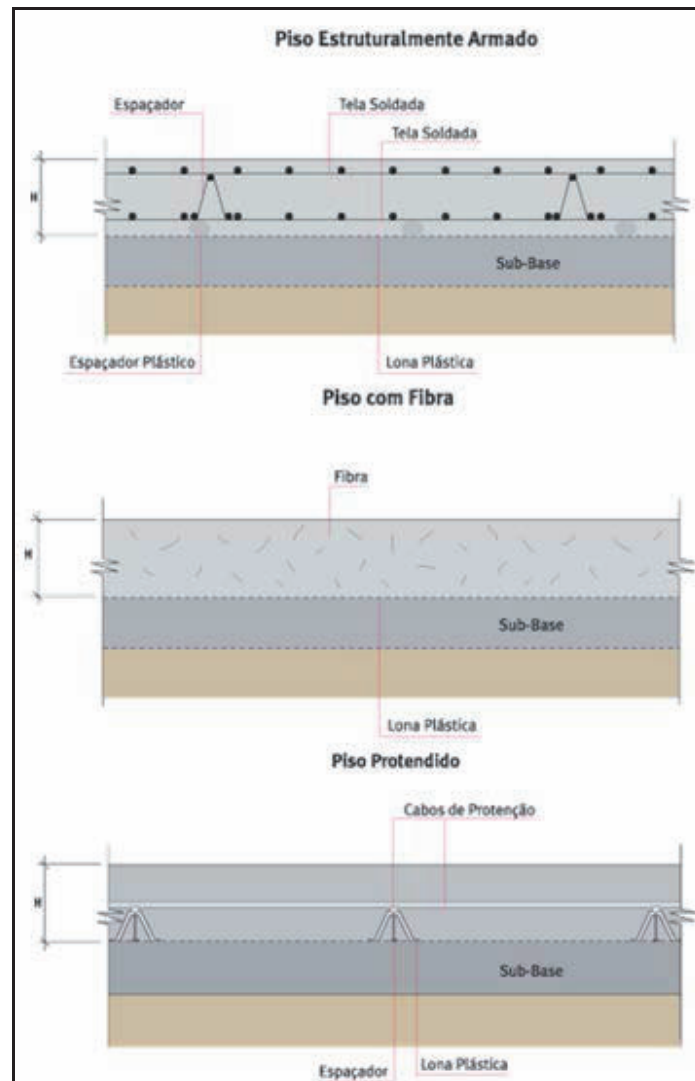


Figura 2: Cortes Esquemáticos de Três Tipos Diferentes de Piso Industrial (<http://www.pisosindustriais.com.br>)

As operações sobre um piso industrial são inúmeras, e implicam em adequações particulares que devem ser consideradas em cada projeto. Por exemplo, uma característica que geralmente é esperada para esses pisos é a baixa retração hidráulica, a qual ajuda no combate ao aparecimento de fissuras não controladas e que podem comprometer a estrutura deste elemento estrutural. Para garantir que isso não ocorra, a etapa de construção do piso deve ser bem planejada, fazendo-se o acompanhamento da execução, principalmente no que tange a adequada cura do concreto e a criação de juntas.

Adicionalmente, a resistência relativa ao desgaste é outro fator a ser considerado no projeto

de um piso. Isso se justifica já que para muitos casos a movimentação de maquinários sobre o concreto está presente e pode vir a provocar um desgaste superficial não desejável, e gerar imperfeições. Assim, o acabamento também acaba sendo uma outra variável a ser escolhida de forma a resistir à agressividade sobre a superfície.



Figura 3: Piso Industrial (<http://www.pisosindustriais.com.br>)

### 3 MODELOS EXISTENTES

Os modelos discretos existentes considerados na representação do maciço de solo neste estudo partem da consideração de que o comportamento tensão-deformação do sistema geotécnico seja independente do tempo e que seja, além disso, elástico. Assim, admite-se que as deformações sejam imediatas, podendo apresentar a relação de elasticidade como linear ou como não linear. Para a situação linear, existe proporcionalidade entre tensão e deformação, expressada pela Lei de Hooke, see Eq. (1). Já para o regime elástico não linear, uma função característica estabelece a relação entre as duas grandezas.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Na Figura 4, os gráficos característicos das duas possíveis formas de regime elástico.

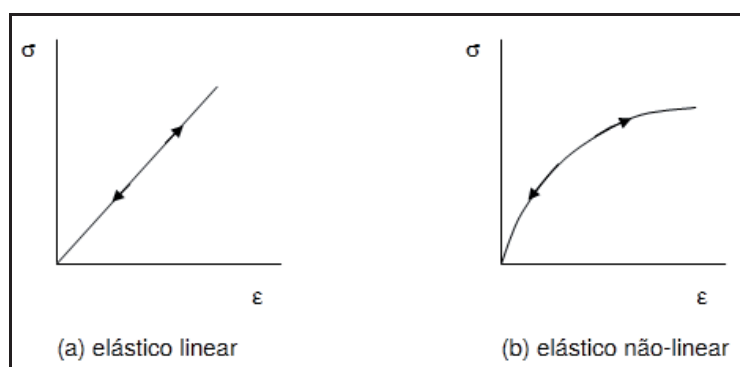


Figura 4: Modelo Idealizado para o Regime Elástico

Para o corpo submetido a um estado de aplicação de tensões unidirecional, o comportamento elástico pode ser representado por uma mola, conforme ilustrado na Figura 5 abaixo.

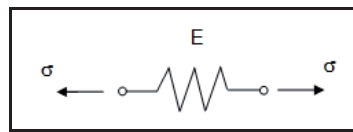


Figura 5: Representação do Modelo Elástico

### 3.1 Modelo de Winkler

Na hipótese de Winkler, um conjunto de molas linearmente elásticas, discretas e espaçadas umas das outras é utilizado para representar o solo nos análises estruturais, como mostra a [Figura 6](#) a seguir. Como apresentado, a transferência de esforços se dá exclusivamente na direção vertical.

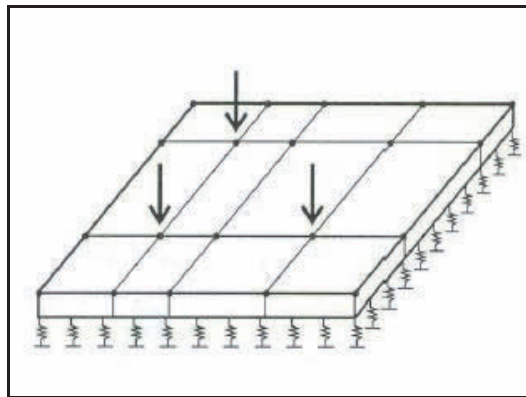


Figura 6: Elementos de Placa sobre Apoio Elástico

Na Eq. (2), uma adequação da Lei de Hooke para o caso particular de deformações verticais formaliza o cálculo para Hipótese de Winkler.

$$\sigma(x,y) = K_s^v \cdot w(x,y) \quad (2)$$

Em que:

- $\sigma(x,y)$  é a tensão de contato média na base da fundação;
- $K_{sv}$  é o módulo de reação vertical, definido a partir do tipo de solo que compõe o maciço de fundação, da área carregada e da profundidade do elemento de fundação; e
- $w(x,y)$  é o deslocamento vertical (recalque).

A  $K_{sv}$  também é chamada pela literatura pelos seguintes nomes: (a) constante de proporcionalidade, (b) coeficiente de reação vertical, (c) coeficiente de recalque e (d) coeficiente de mola.

Dentro de suas considerações, a ideia do modelo de utilizar molas elásticas como efeito de cálculo em substituição ao maciço de solo implica em considerar a relação tensão-deformação como linear, o que é comprovadamente irreal, e que a ocorrência das deformações é tida apenas nas regiões em que são aplicadas as cargas, não admitindo sua dispersão ao longo da profundidade do solo. Essa última falha decorre da simplicidade do método em ignorar as ligações coesivas entre as partículas do maciço, afirmando a independência entre as molas, e é colocado como o pior demérito por [Dutta \(2002\)](#). Apesar da simplicidade evidente, o modelo de Winkler traz como grande vantagem uma modelagem numérica mais rápida de ser realizada, com resultados aparentemente satisfatórios.

### 3.2 Meio Contínuo

O Meio Contínuo configura-se como uma maneira mais real de se representar o solo, uma vez que permite avaliar a distribuição de tensões ao longo do contínuo do solo. Ou seja, enquanto na Hipótese de Winkler o solo é considerado homogêneo e isotrópico, na modelagem do solo como meio contínuo pode-se pressupor um solo anisotrópico e com camadas distintas, sendo possível até mesmo a análise dos recalques de cada uma delas.

Um dos principais inconvenientes no uso do modelo contínuo elástico é imprecisão dos valores para as reações calculados nas periferias da fundação (Dutta, 2002). Isso quer dizer que os pontos mais afastados e localizados cada vez mais próximos das bordas do maciço criado na modelagem computacional representam o comportamento físico do solo cada vez menos condizente com a realidade. No entanto, para se obter uma gama maior de resultados mais precisos, o contínuo pode ser ampliado, e ocupar um domínio também maior.

Duas formas de cálculo são apresentadas para este modelo. Uma delas se dá analiticamente, não se mostrando eficaz para todos os tipos de problemas e outra, que permite resolver um leque muito maior de situações utilizando os métodos numéricos, entre os quais se optou pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) neste trabalho.

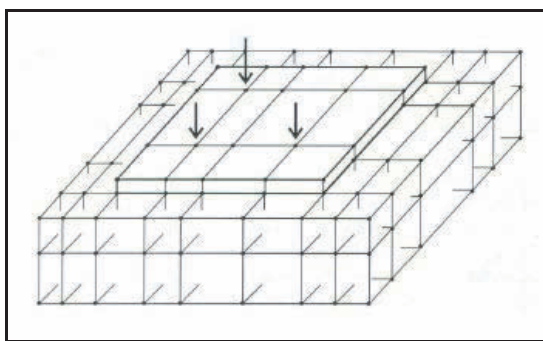


Figura 7: Elementos de Placa sobre Elementos Sólidos

## 4 MODELAGEM NUMÉRICA

Dois exemplos foram estudados nesse artigo: um piso industrial projetado para ser a base de um posto de abastecimento de caminhões tanque e um piso industrial projetado para ser a base de um posto de recebimento de óleo diesel. Ambos os pisos foram dimensionados pelos dois modelos estudados: solo como um meio elástico e o solo como um maciço geotécnico contínuo.

O solo como um meio elástico é representado por um conjunto de molas linearmente elásticas e mutuamente independentes, discretas e rigorosamente espaçadas. Para correlacionar os dois modelos (Winkler e Meio Contínuo), fixou-se um solo cujo  $N_{spt}$  médio é 10 golpes (material argiloso). (Hachic, 1999) apresenta uma correlação entre os parâmetros geotécnicos  $K$  (rigidez da mola),  $E$  (módulo de elasticidade) e  $N_{spt}$ . Nesse estudo, a rigidez das molas utilizadas foram de 480 t/m aplicadas perpendicularmente ao piso e o módulo de elasticidade correspondente do solo foi igual a 4500 t/m<sup>2</sup>.

Para a modelagem numérica do piso industrial, considerou-se um concreto de 30 MPa e módulo de elasticidade de 2607159 t/m<sup>2</sup>. O peso específico do solo considerado foi de 1,8 tf/m<sup>3</sup>.

O elemento SHELL, adotado na modelagem do piso, tem a forma definida por quatro nós, onde cada nó possui 6 graus de liberdade (3 de translação e 3 de rotação). Para garantir a qualidade dos resultados obtidos, um estudo da dimensão da malha foi elaborado. Inicialmente

adotou um elemento quadrático de  $100 \times 100 \text{ cm}^2$ , na seqüência  $80 \times 80$ ,  $60 \times 60$  e enfim  $40 \times 40 \text{ cm}^2$ , onde obteve-se convergência dos resultados de momento, cortante e deflexão.

O elemento SOLID, adotado na modelagem do solo como contínuo, tem a forma definida por 8 (oito) nós designados e seis faces ou planos perpendiculares entre si.

Para o primeiro estudo, o posto para abastecimento de caminhões tanque, área de  $171 \text{ m}^2$ , foi considerada uma tensão de  $6,30 \text{ tf/m}^2$ , correspondente ao peso do caminhão e aplicada conforme a figura que se segue: primeiro com o veículo em posição de abastecimento e depois entrando no piso, com carregamento na borda.

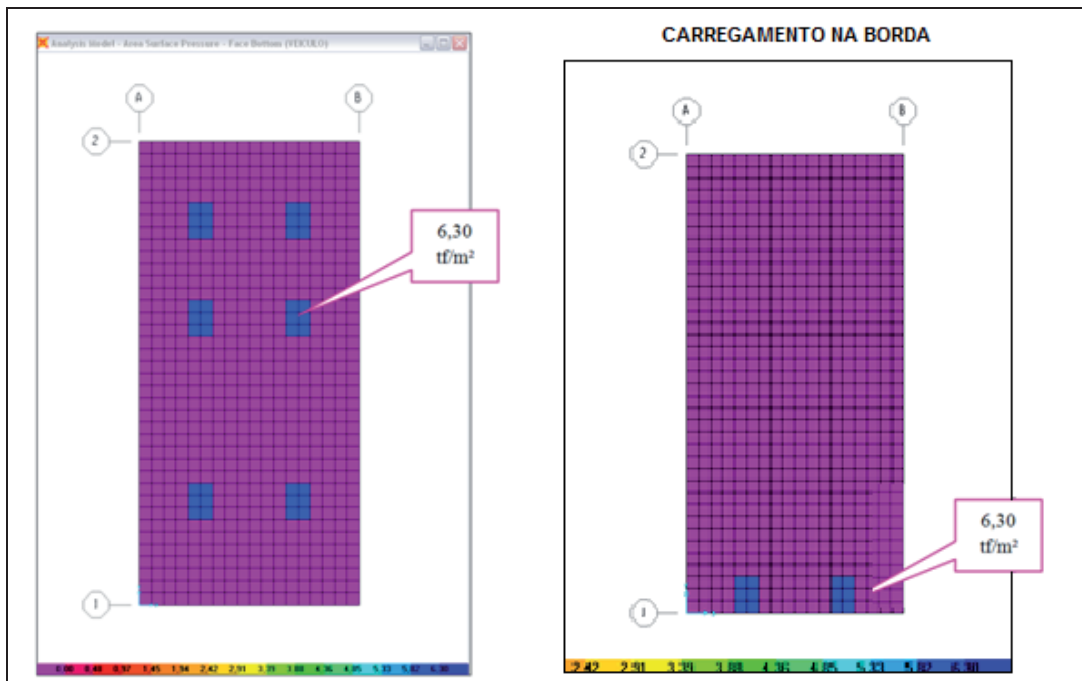


Figura 8: Peso do Caminhão do Posto de Abastecimento

Para o segundo caso, o posto para recebimento de óleo diesel, área  $186 \text{ m}^2$ , na qual foi considerada uma tensão de  $7,03 \text{ t/m}^2$ , correspondente ao peso do caminhão e aplicada conforme a figura que se segue: primeiro com o veículo no posto e depois entrando no piso, com o carregamento na borda.

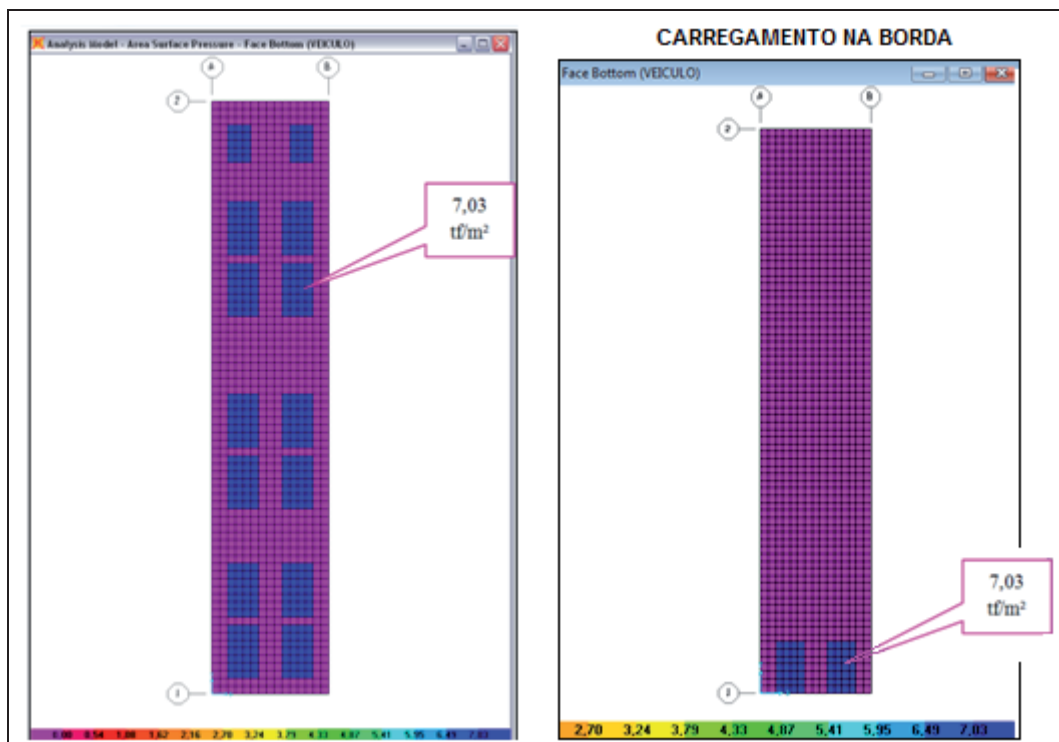


Figura 9: Peso do Caminhão do Posto de Recebimento de Óleo Diesel



## 5 RESULTADOS

### 5.1 Posto de Abastecimento de Caminhão Tanque

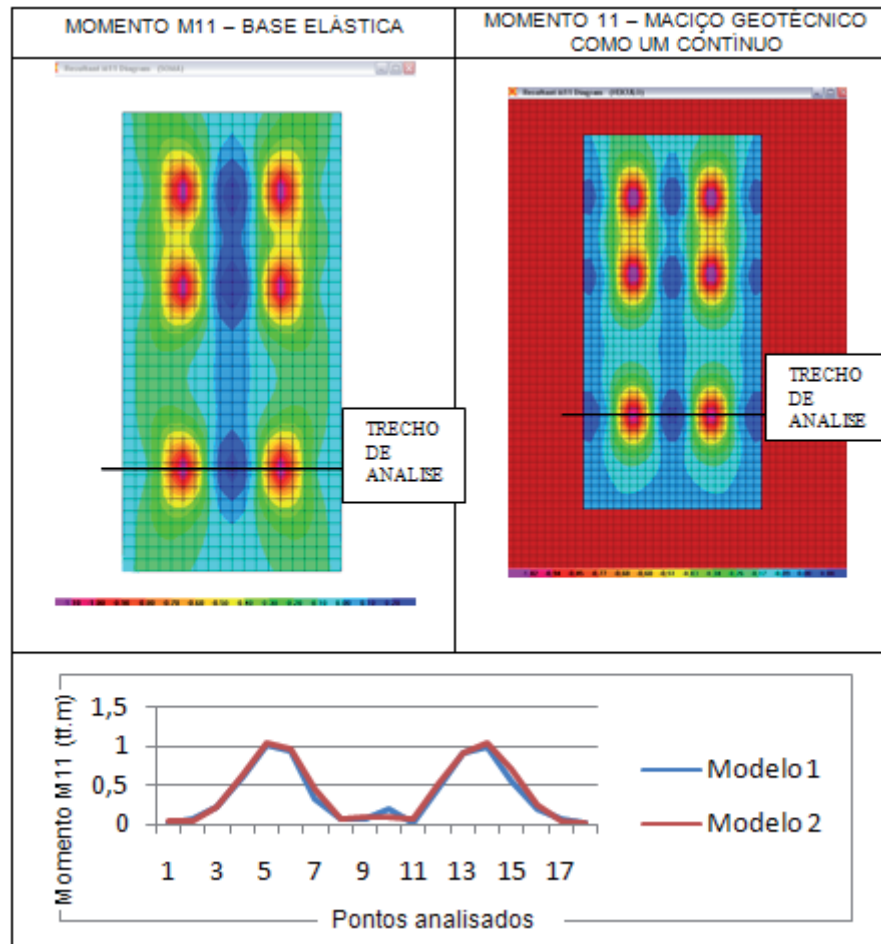


Figura 10: Momentos M11 (tf.m) modelo 1 e modelo 2

A Figura 10 representa os momentos fletores M11 dos dois modelos, à esquerda modelo 1 que considera o solo como base elástica e à direita modelo 2 que considera o solo como meio contínuo. O gráfico apresenta os resultados encontrados nos trechos de análise, assinalados nas figuras. O eixo das ordenadas corresponde aos valores dos momentos, em tonelada força vezes metro (tf.m) e o eixo das abscissas aos pontos estudados. Os resultados são próximos, sendo que a variação entre os valores máximos dos momentos é da ordem de 3%, aproximadamente no ponto 5.

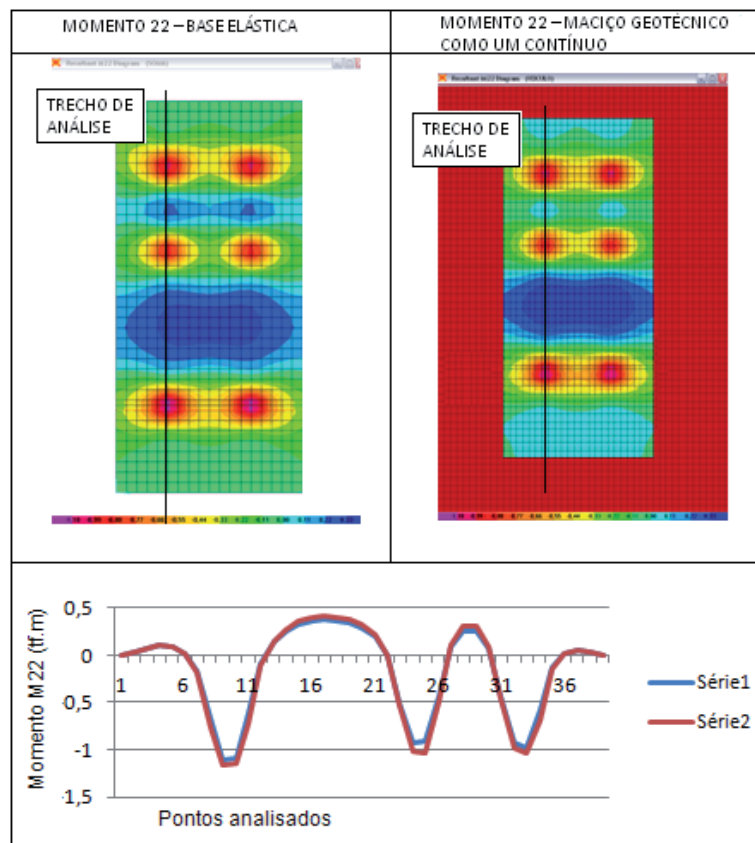


Figura 11: Momentos M22 (tf.m) modelo 1 e modelo 2

Seguindo o mesmo raciocínio, a [Figura 11](#) representa os momentos fletores M22 dos dois modelos. O gráfico apresenta os resultados encontrados nos trechos de análise, assinalados nas figuras, sendo que a variação entre os valores máximos dos momentos é da ordem de 4%, aproximadamente no ponto 9.

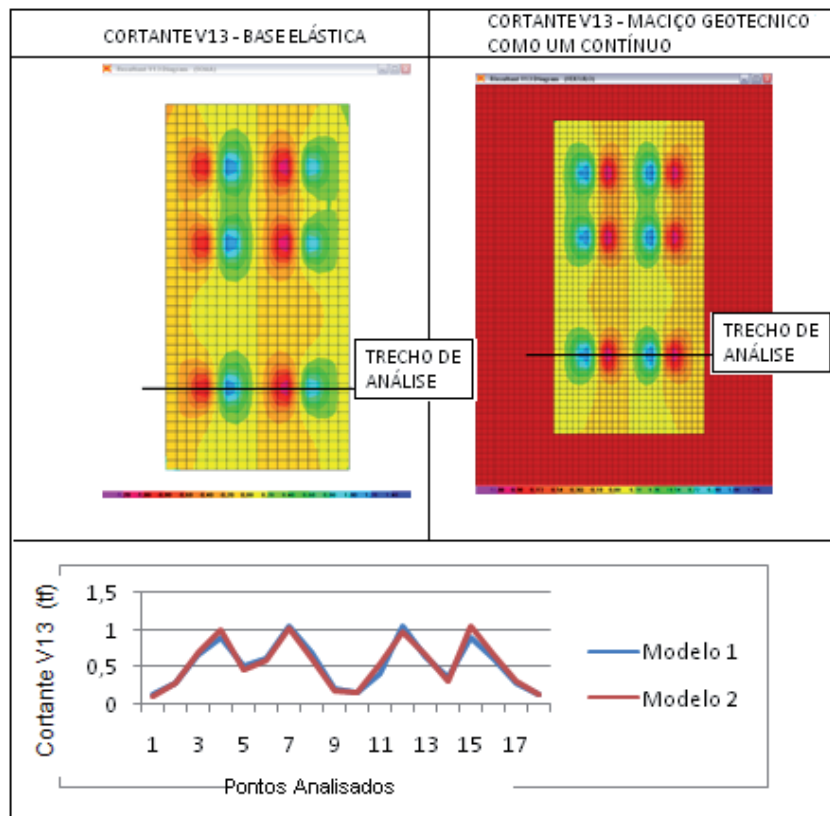


Figura 12: Cortantes V13 (tf) modelo 1 e modelo 2

A Figura 12 representa as forças cortantes V13 dos dois modelos. O gráfico apresenta os resultados encontrados nos trechos de análise, assinalados nas figuras, sendo que a variação entre os valores máximos entre as cortantes é da ordem de 1%, aproximadamente no ponto 7.

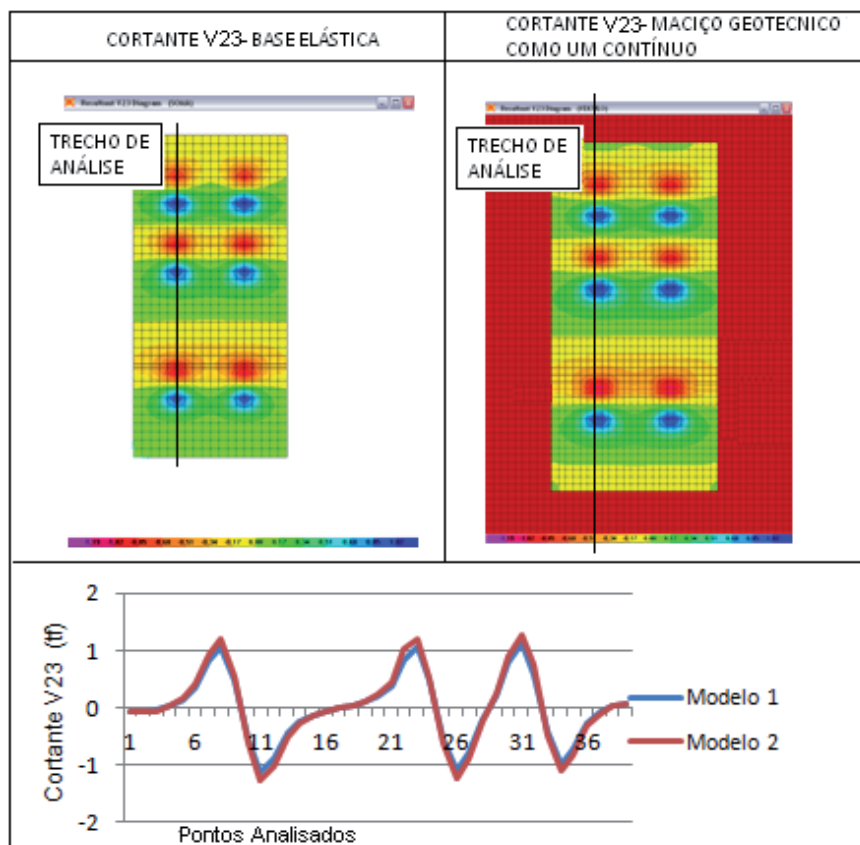


Figura 13: Cortantes V23 (tf) modelo 1 e modelo 2

A Figura 13 representa as forças cortantes V23 dos dois modelos. O gráfico apresenta os resultados encontrados nos trechos de análise, assinalados nas figuras, sendo que a variação entre os valores máximos entre as cortantes é da ordem de 5%, aproximadamente no ponto 31.

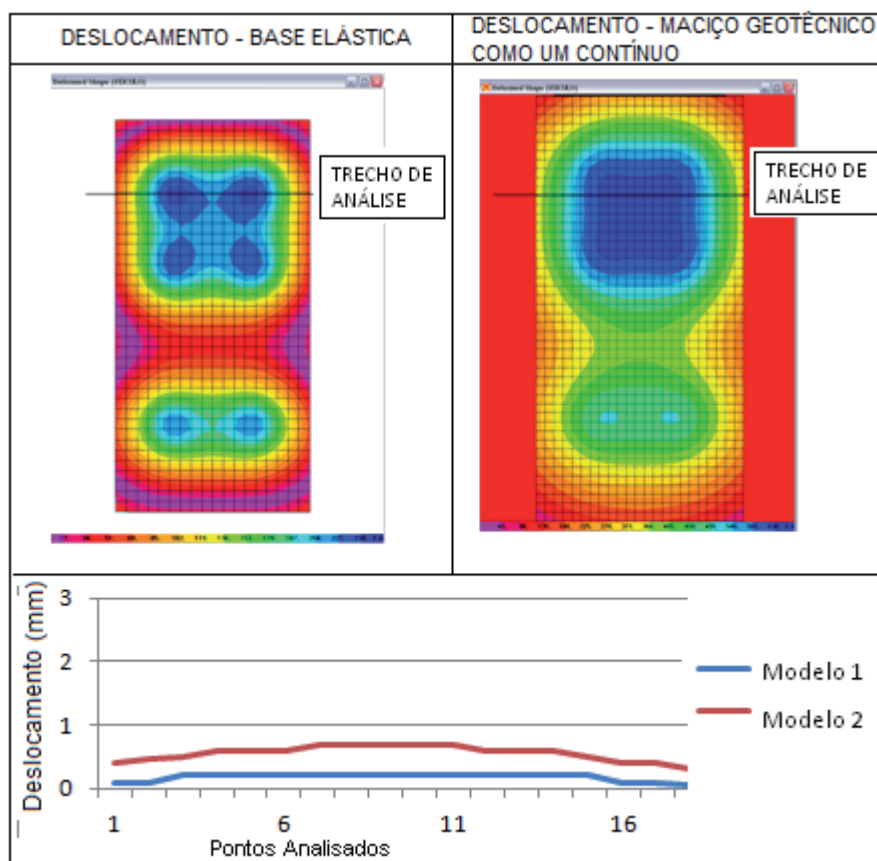


Figura 14: Deslocamentos (mm) modelo 1 e modelo 2 para carregamento na borda

A Figura 14 representa deslocamentos, medidos em metro, dos dois modelos. O gráfico apresenta os resultados encontrados nos trechos de análise, assinalados nas figuras, sendo que a variação entre os valores máximos de deslocamento é da ordem de 70%, aproximadamente no ponto 9.

Como os valores de deflexão encontrados são muito pequenos, torna-se interessante, comparar os valores de deslocamento máximo entre cada modelo com um valor de referência.

Para este artigo, considerou-se uma deflexão máxima de 3 cm. No modelo 1 encontrou-se 0,02 cm de deflexão, o que corresponde a 0,66% do valor de referência. No modelo 2, o valor de referência do deslocamento é 0,07 cm, o que corresponde a 2,3% do valor de referência. Conclui-se portanto que, embora as deflexões são diferentes entre os dois modelos (valores muito pequenos) em relação a um valor de referência os mesmos são muito próximos.

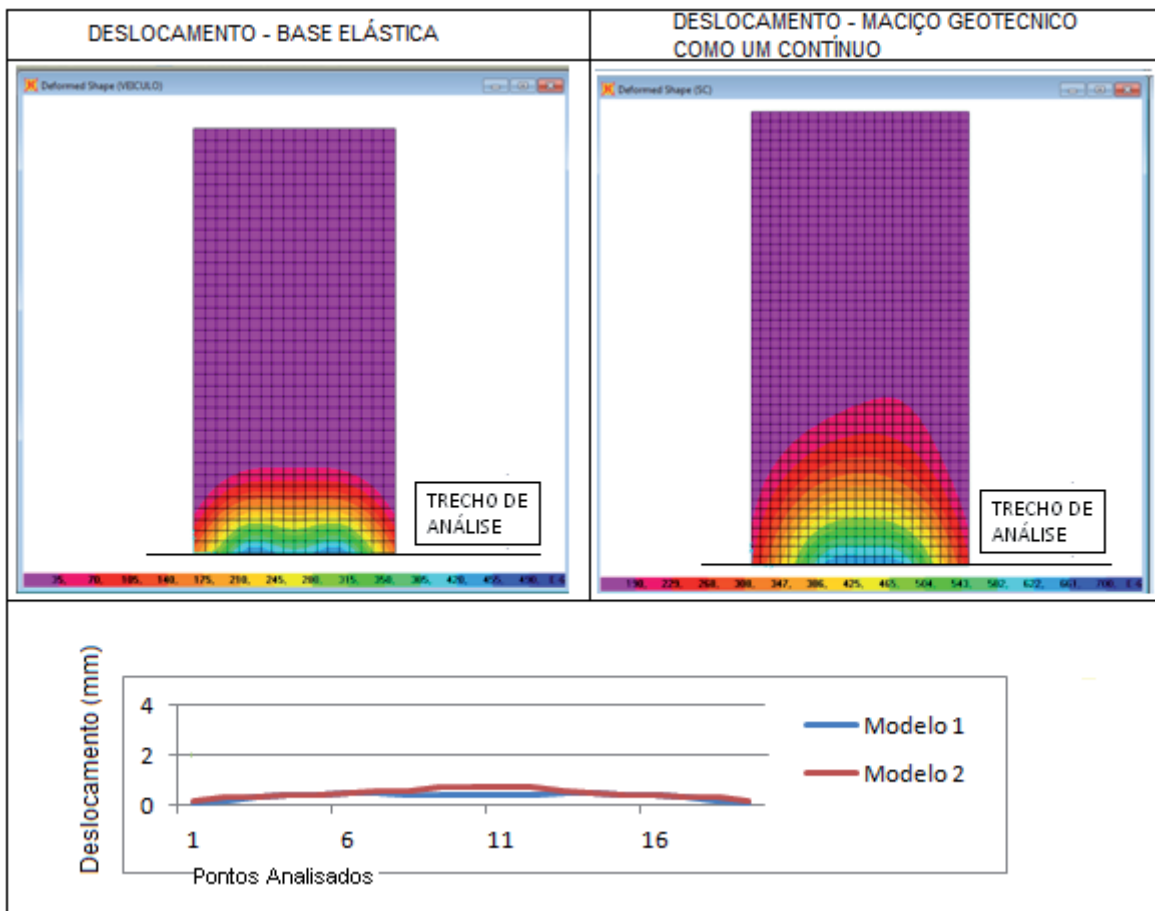


Figura 15: Deslocamentos na transversal (mm) modelo 1 e modelo 2

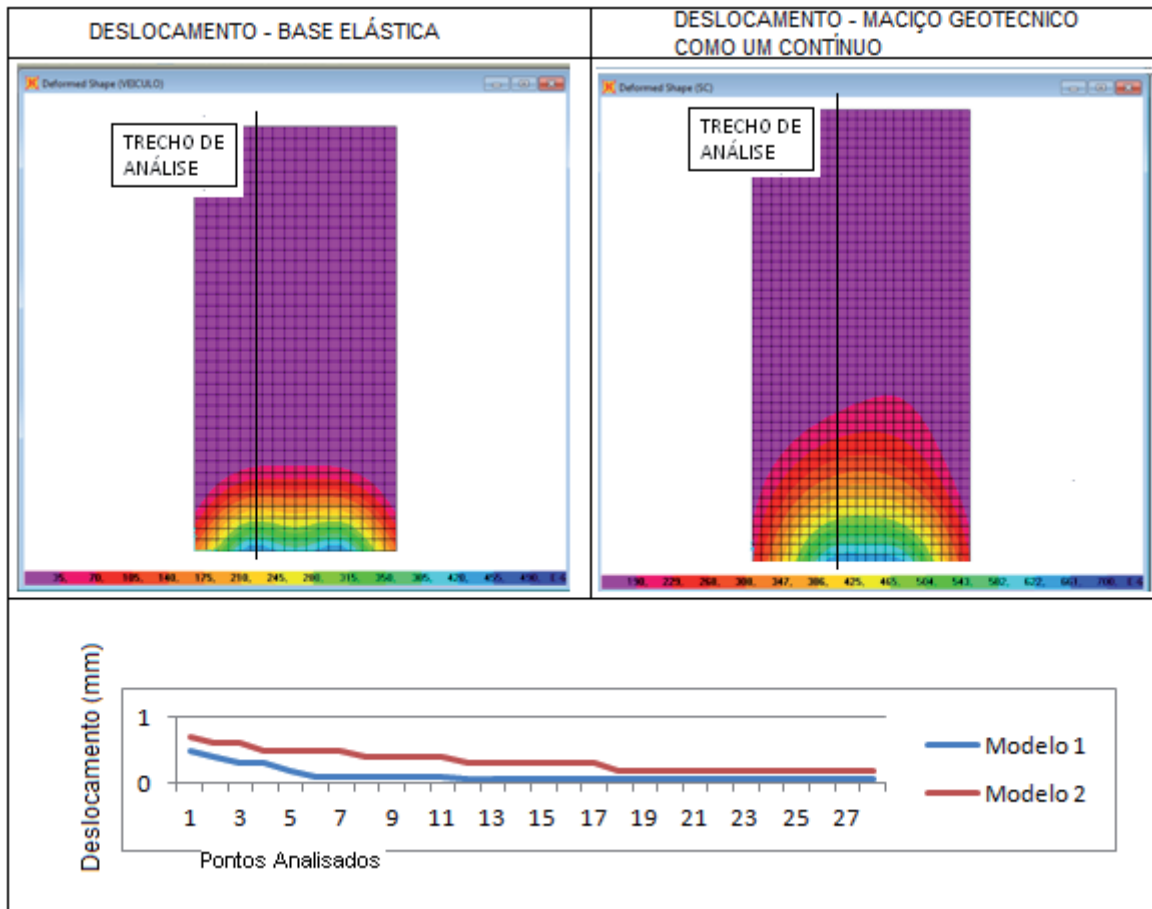


Figura 16: Deslocamentos na longitudinal (mm) modelo 1 e modelo 2

Percebe-se, a partir dos resultados encontrados, que a situação mais desfavorável no cálculo de pisos é quando o veículo entra no piso (deslocamentos de 0,04 e 0,07cm), ou seja, quando existe uma carga concentrada nas bordas. Sendo assim, a ferragem a ser utilizada no dimensionamento do piso em análise deverá ser calculada para essa hipótese de carregamento.

## 5.2 Piso para Recebimento de Óleo Diesel

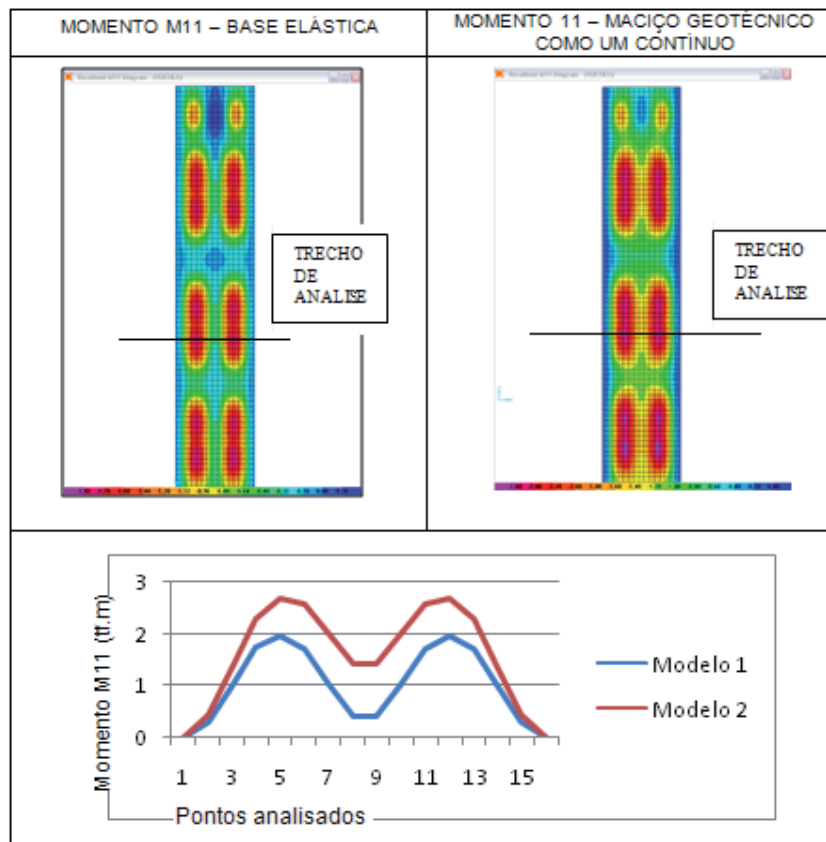


Figura 17: Momento M11 (tf.m) modelo 1 e modelo 2

A Figura 17 representa os momentos fletores M11 dos dois modelos, à esquerda modelo 1 que considera o solo como base elástica e à direita modelo 2 que considera o solo como meio contínuo. O gráfico apresenta os resultados encontrados nos trechos de análise, assinalados nas figuras. A variação entre os valores máximos dos momentos é da ordem de 30%, aproximadamente no ponto 5.



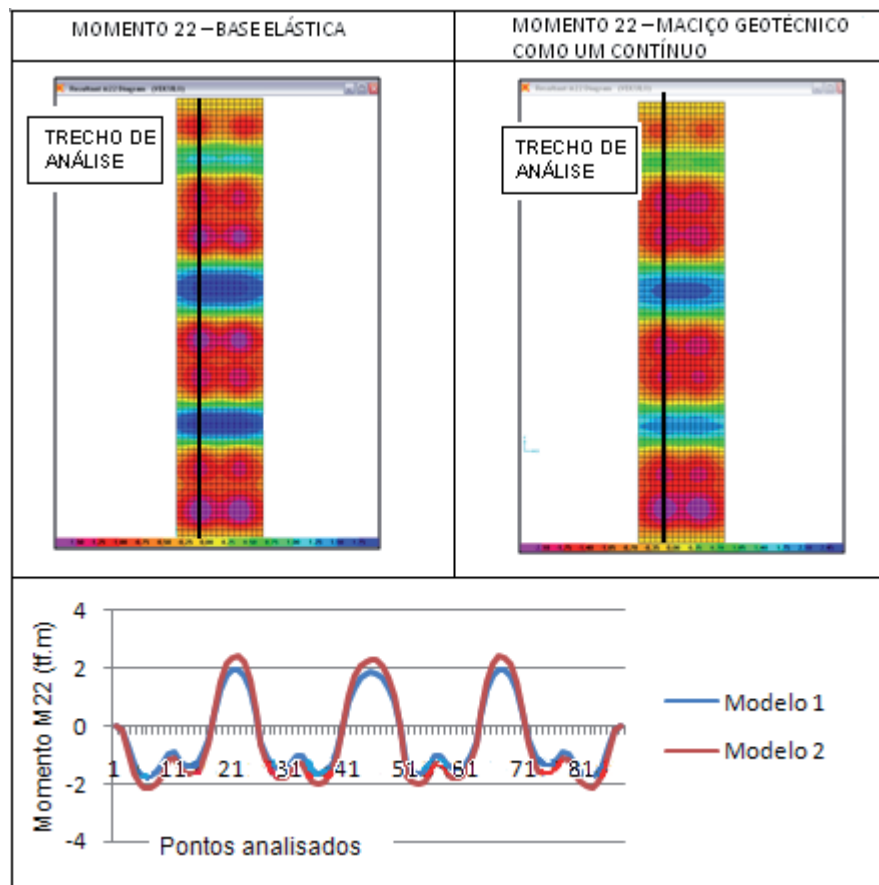


Figura 18: Momentos M22 (tf.m) modelo 1 e modelo 2

A Figura 18 representa os momentos fletores M22 dos dois modelos. O gráfico apresenta os resultados encontrados nos trechos de análise, assinalados nas figuras, sendo que a variação entre os valores máximos dos momentos é da ordem de 27%, aproximadamente no ponto 70.

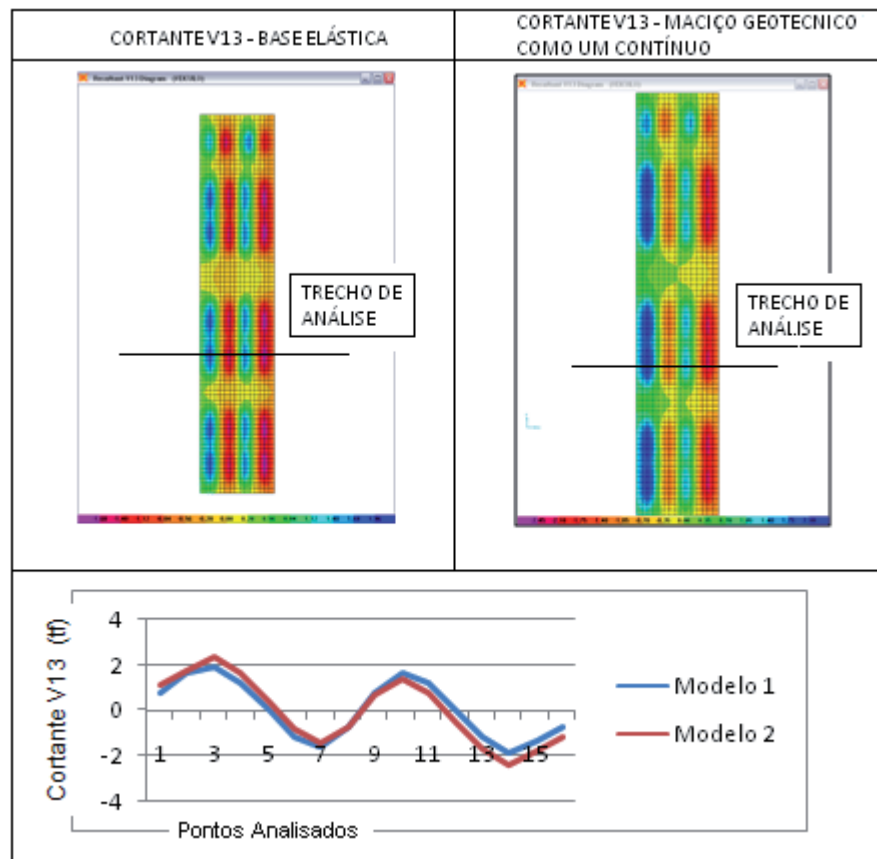


Figura 19: Cortantes V13 (tf) modelo 1 e modelo 2

A Figura 19 representa as forças cortantes V13 dos dois modelos. O gráfico apresenta os resultados encontrados nos trechos de análise, assinalados nas figuras, sendo que a variação entre os valores máximos entre as cortantes é da ordem de 20%, aproximadamente no ponto 3.

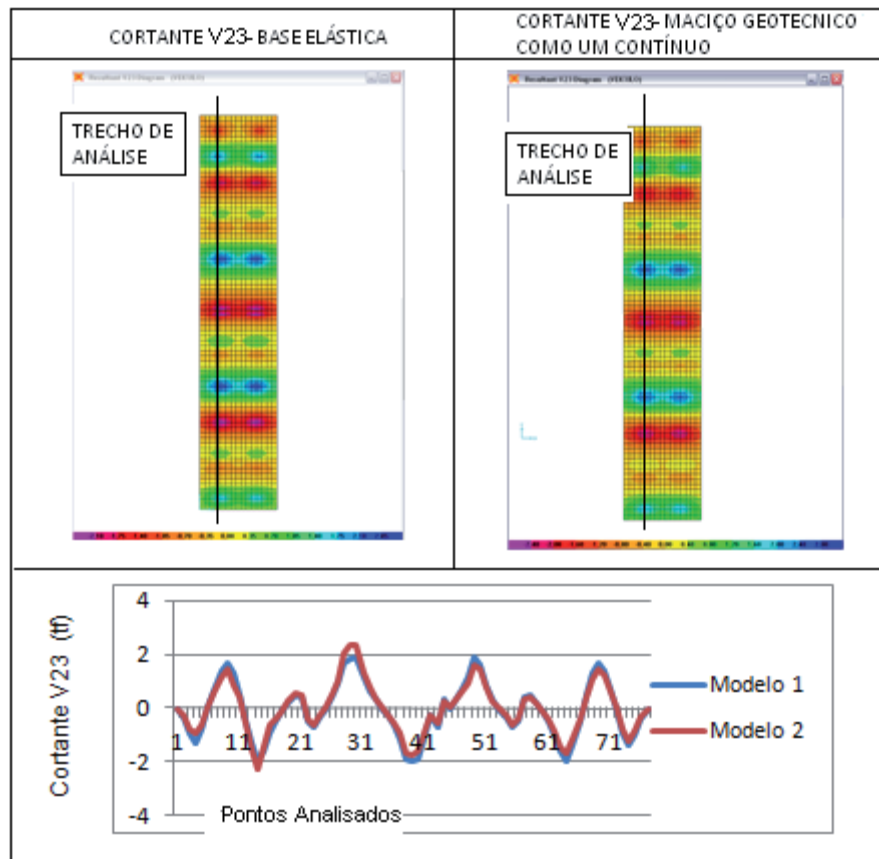


Figura 20: Cortantes V23 (tf) modelo 1 e modelo 2

A Figura 20 representa as forças cortantes V23 dos dois modelos. O gráfico apresenta os resultados encontrados nos trechos de análise, assinalados nas figuras, sendo que a variação entre os valores máximos entre as cortantes é da ordem de 16%, aproximadamente no ponto 30.

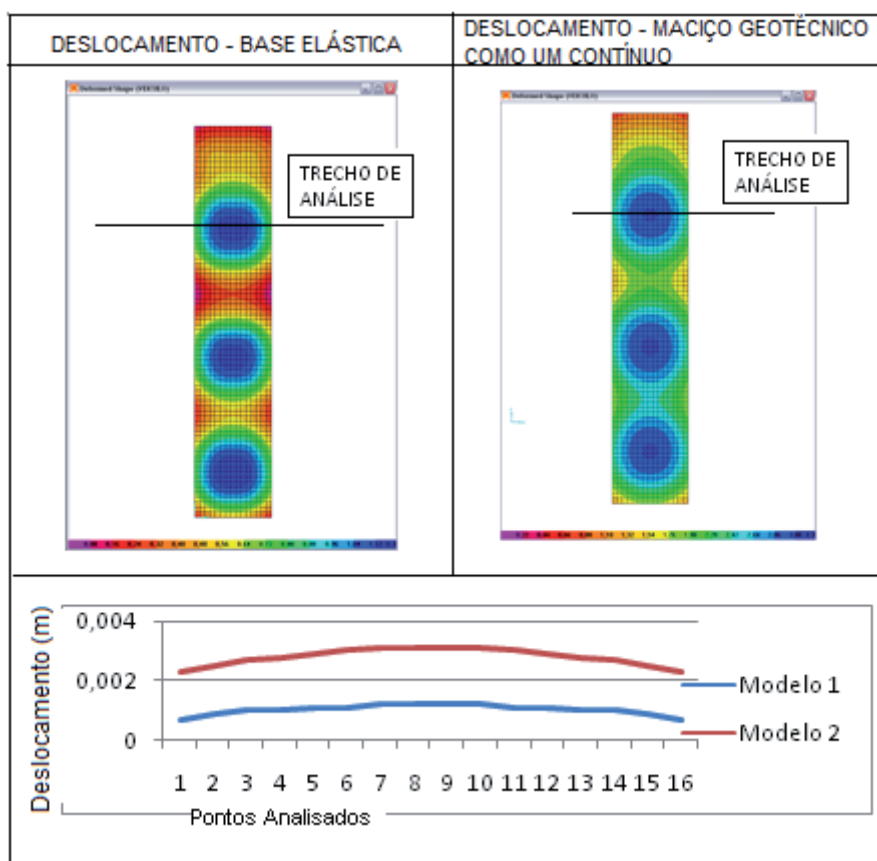


Figura 21: Deslocamentos (m) modelo 1 e modelo 2

A Figura 21 representa deslocamentos, medidos em metro, dos dois modelos. O gráfico apresenta os resultados encontrados nos trechos de análise, assinalados nas figuras, sendo que a variação entre os valores máximos de deslocamento é da ordem de 70%, aproximadamente no ponto 9.

Como os valores de deflexão encontrados são muito pequenos, torna-se interessante, comparar os valores de deslocamento máximo entre cada modelo com um valor de referência.

Para este artigo, considerou-se uma deflexão máxima de 3 cm. No modelo 1, encontrou-se 0,12 cm de deflexão, o que corresponde a 4% do valor de referência. No modelo 2, o valor máximo de deslocamento é 0,31 cm, o que corresponde a 10% do valor de referência. Conclui-se, portanto, que, embora as deflexões são diferentes entre os dois modelos (valores muito pequenos) em relação a um valor de referência os mesmos são muito próximos

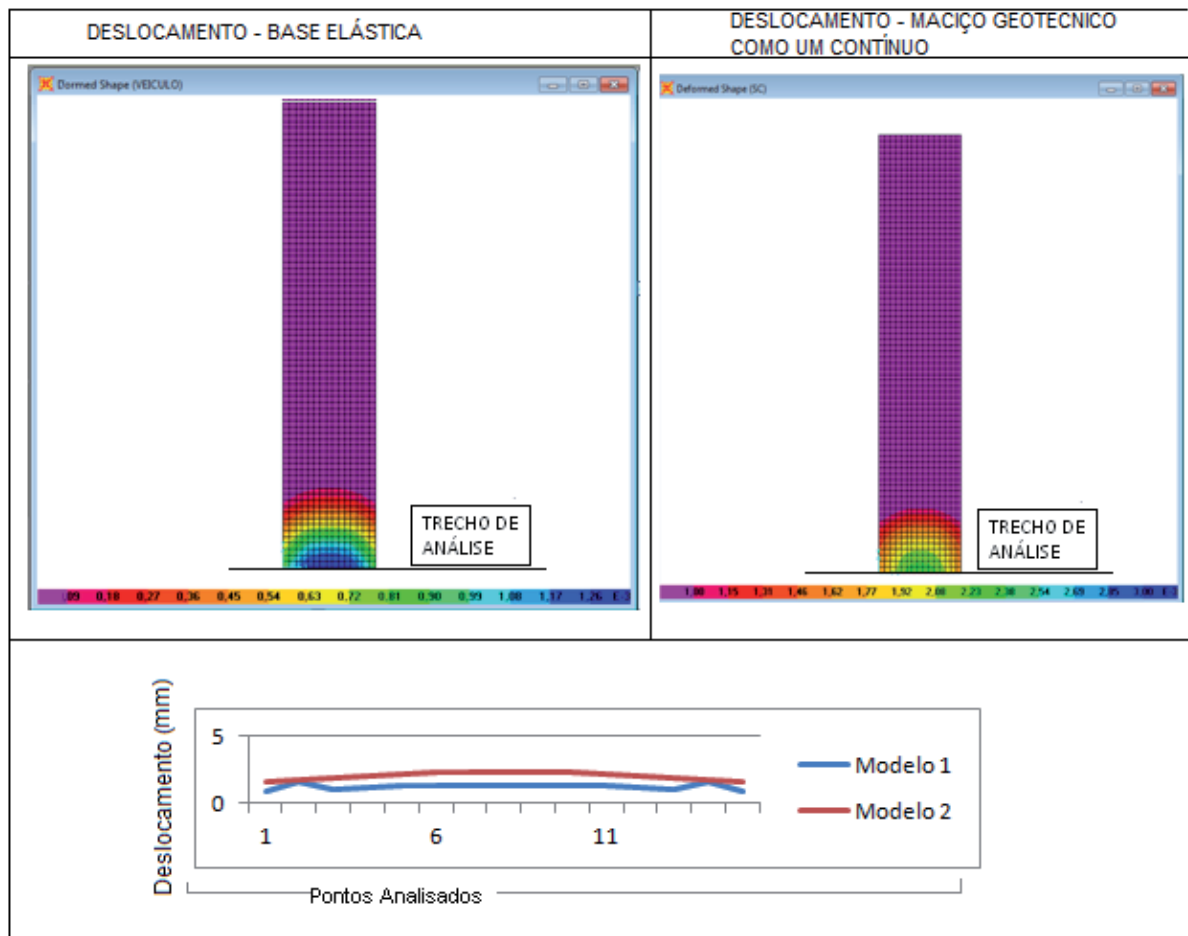


Figura 22: Deslocamentos na transversal (mm) modelo 1 e modelo 2 para carregamento na borda

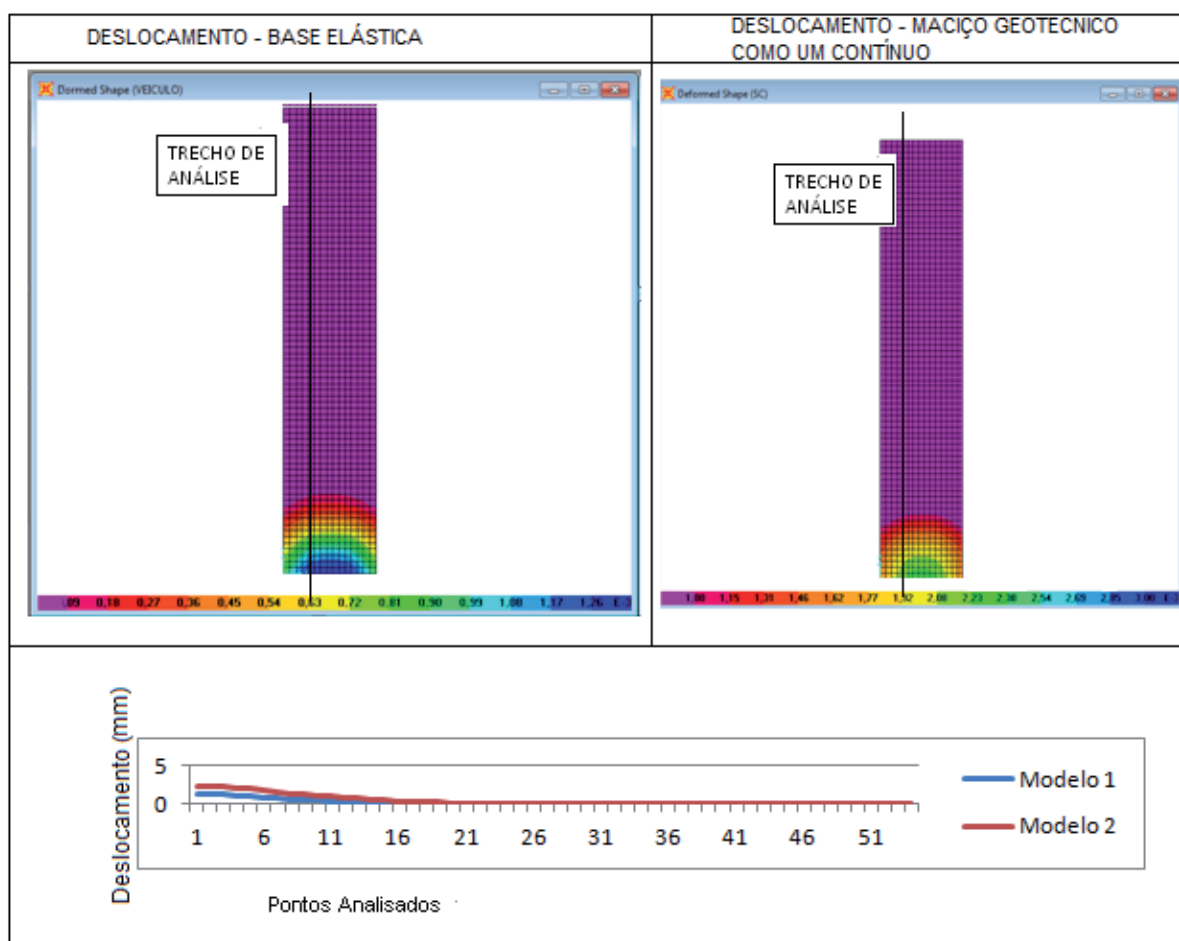


Figura 23: Deslocamentos na longitudinal (mm) modelo 1 e modelo 2 para carregamento na borda

Percebe-se, a partir dos resultados encontrados, que a situação mais desfavorável no cálculo de pisos é quando o veículo entra no piso, ou seja, quando existe uma carga concentrada nas bordas. Sendo assim, a ferragem a ser utilizada no dimensionamento do piso em análise deverá ser calculada para essa hipótese de carregamento.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Embora o modelo de molas seja bastante simplificado, verificou-se, neste trabalho, que as diferenças em relação ao modelo que representa o maciço de solos através de elementos sólidos tridimensionais não são muito grandes do ponto de vista do dimensionamento estrutural. Ambas as situações irão propor armadura mínima de flexão; portanto, continua sendo uma alternativa viável no dia-a-dia de projeto.

Em síntese, constatou-se que um dos efeitos provocados pela interação solo estrutura é uma redistribuição de esforços (tensões) e deformações ao longo do radier. Essa redistribuição depende, entre outras coisas, da rigidez relativa estrutura-solo. Quando se considera o solo como meio contínuo, percebe-se em geral uma redução do deslocamento máximo, em relação ao modelo de molas.

Uma dificuldade adicional em termos de análise estrutural e geotécnica no modelo 2 (sólidos) é a caracterização das propriedades físicas do solo (coeficiente de Poisson e Módulo

de Elasticidade E) a partir de uma simples correlação entre o NSPT. Uma série de simplificações já são feitas nesta fase, simplificações estas que modificam o resultado final da análise. Além disso, a modelagem do solo como contínuo se mostrou muito demorada e, portanto, uma variável que deve ser levada em conta na hora de se elaborar um projeto.

## REFERÊNCIAS

- Bowles, J. E., *Foundation Analysis and Design*. 4. ed.. New York: McGraw-Hill, 1988.
- Cristelli, R., *Pavimentos Industriais de Concreto – Análise do Sistema Construtivo*. Belo Horizonte, 161p. Monografia (Especialização) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.
- Dutta, S. C.; Roy, R., *A Critical Review on Idealization and Modeling for Interaction Among Soil-Foundation-Structure System*. Computers and Structures, Elsevier, v. 80, p.1579-1594, 2002.
- Porto, T. B., *Estudo da Interação de Paredes de Alvenaria Estrutural com a Estrutura de Fundação*, 243p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- Rodrigues, P. P. F. et AL., *Manual Gerdau de Pisos Industriais*. Ed. PINI, 1ª Ed., São Paulo 2009. 109p.
- Hachic, W, et. AL., *Fundações: Teoria e Prática*, Ed. PINI, 2ª Ed., São Paulo 1999.