XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/34

Avaliação dos impactos estruturais e geotécnicos decorrentes do uso de diferentes métodos de determinação do coeficiente de Winkler em sapatas e radier

Matheus Albuquerque Salvo
Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, matheusalbuquerque@ufmg.br

Lúcio Flávio de Souza Villar
Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, lvillar@etg.ufmg.br

Luis Santos Duarte
Tractebel Engie, Belo Horizonte, Brasil, luis.santos@tractebel.engie.com

Victor Tadeu Lacerda
Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, vtl@ufmg.br

RESUMO: A interação solo–estrutura (ISE) desempenha papel determinante no desempenho de fundações superficiais. Este artigo avalia os impactos da utilização de diferentes métodos de determinação do coeficiente de Winkler, especificamente os métodos de Piancastelli (2012), Tepedino (1980) e Morrison (1993), aplicados ao dimensionamento de sapatas e radiers em um galpão industrial. As modelagens numéricas realizadas no software SAP2000 mostram que cada método influencia de maneira distinta os valores dos deslocamentos, das tensões de contato e a redistribuição de esforços, evidenciando a necessidade de uma escolha criteriosa do valor do Coeficiente de Reação Vertical (Kv).

PALAVRAS-CHAVE: Interação Solo–Estrutura (ISE), Coeficiente de Winkler, Fundações Superficiais, Modelagem Numérica, Sapata e Radier.

ABSTRACT: The soil–structure interaction (SSI) plays a decisive role in the performance of shallow foundations. This article evaluates the impacts of using different methods for determining the soil vertical reaction coefficient (Kv), specifically the methods proposed by Piancastelli (2012), Tepedino (1980), and Morrison (1993), applied to the design of footings and rafts in an industrial building. Numerical simulations carried out using the SAP2000 software show that each method influences displacements, contact stresses, and the redistribution of internal forces in distinct ways, highlighting the need for a careful selection of the Kv value.

KEYWORDS: Soil–Structure Interaction (SSI), Winkler Coefficient, Shallow Foundations, Numerical Modeling, Footing and Raft Foundation.

1 INTRODUÇÃO

A interação solo–estrutura (ISE) constitui um dos principais fatores que controlam o comportamento de fundações superficiais, especialmente em edificações industriais que estão sujeitas a diferentes níveis de rigidez e redistribuição de esforços. Entre os modelos empregados para representar essa interação, a hipótese de Winkler permanece amplamente utilizada na engenharia estrutural devido à sua simplicidade e à capacidade de aproximar o comportamento do solo por meio de molas lineares distribuídas (BOWLES, 1997). Entretanto, a determinação adequada do coeficiente de reação vertical do solo (Kv) é fundamental para que o modelo represente de maneira consistente as características geotécnicas envolvidas.

Neste estudo, são analisados comparativamente três métodos de obtenção de Kv: Piancastelli (2012), Tepedino (1980) e Morrison (1993), aplicados ao dimensionamento de sapatas e radiers em um galpão industrial. A metodologia adotada envolve modelagens tridimensionais no software SAP2000, mantendo-se constantes todas as propriedades estruturais e geotécnicas para que apenas a variação de Kv influencie a resposta global do sistema.

2 METODOLOGIA

Foram analisadas duas soluções de fundação superficial aplicadas a um galpão industrial: sapatas isoladas e radier. A escolha dessas tipologias fundamenta-se em sua ampla aplicação em estruturas industriais e nas diferenças no mecanismo de transferência de cargas ao solo. Enquanto as sapatas transmitem os esforços estruturais de forma pontual, o radier promove uma distribuição mais uniforme das cargas sobre a superfície de contato com o terreno. Dessa forma, a consideração dessas duas alternativas permite avaliar comparativamente os efeitos da determinação do coeficiente de reação do solo no comportamento da interação solo–estrutura.

As análises estruturais foram realizadas com o auxílio do software SAP2000, mantendo-se constantes todas as variáveis geométricas e de carregamento do modelo estrutural, com exceção do valor do coeficiente de reação vertical do solo (Kv). Para a representação da interação solo–estrutura, adotou-se o modelo de Winkler, no qual o solo é idealizado por meio de um conjunto de molas lineares independentes distribuídas ao longo da base da fundação. Esse modelo permite representar de forma simplificada a deformabilidade do solo e sua influência no comportamento estrutural (CASELUNGHE; ERIKSSON, 2012).

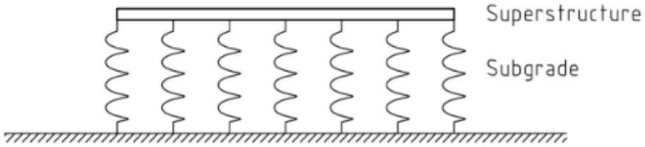


Figura 1. Representação do modelo de Winkler de CASELUNGHE, A. e ERIKSSON, J. (2012).

Para a caracterização geotécnica do terreno de fundação, utilizou-se um boletim de sondagem à percussão (SPT) previamente executado na área de implantação do galpão. A partir dos resultados obtidos, adotou-se como referência a média dos valores de NSPT correspondentes às três primeiras camadas de solo imediatamente abaixo da superfície do terreno, consideradas representativas da região do bulbo de tensões influenciado pelas fundações superficiais.

Com base nesse valor médio, procedeu-se à estimativa da tensão admissível do solo por meio da correlação empírica apresentada na Equação (1), conforme proposto por Albieiro e Cintra (2016). A aplicação dessa relação resultou em uma tensão admissível de 1,0 kgf/cm², valor adotado como parâmetro nas análises estruturais e geotécnicas subsequentes..

$$\sigma_a = \frac{\overline{Nspt}}{5} \tag{1}$$

Para a determinação do coeficiente de reação vertical do solo (Kv), foram considerados três métodos de estimativa amplamente utilizados na literatura técnica: os métodos propostos por Tepedino (1980), Morrison (1993) e Piancastelli (2012). Esses métodos apresentam abordagens distintas para a determinação do coeficiente de reação do solo, baseando-se em diferentes correlações entre parâmetros geotécnicos e características das fundações.

A escolha desses métodos deve-se à sua aplicação em estudos de interação solo–estrutura e à possibilidade de comparação entre diferentes formas de estimativa do coeficiente de Winkler. Enquanto algumas formulações se baseiam em correlações empíricas associadas à tensão admissível do solo e às características do terreno, outras consideram parâmetros relacionados à rigidez do sistema solo–fundação. Dessa forma, a utilização desses três métodos permite avaliar a sensibilidade das análises estruturais às variações no coeficiente de reação vertical do solo, possibilitando uma análise comparativa dos impactos desses modelos no comportamento das fundações analisadas.

2.1 PIANCASTELLI (2012)

Para o método teórico de Piancastelli (2012), foi obtido o coeficiente de Winkler com base na Equação (2) e (3):

$$k = C_r * A \quad (2)$$

Onde C_r é o coeficiente de recalque do solo e A é a área de solo a ser discretizada por uma única mola.

$$C_\mathrm{r} = \frac{E_S}{B.f} \quad (3)$$

Sendo que E_S é módulo de elasticidade do solo, B a largura da fundação direta e f é um coeficiente obtido pela relação entre espessura da camada de solo deformável pela largura da fundação e o comprimento da fundação sobre a largura, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Definição dos valores de f, adaptado de PIANCASTELLI (2012).

-	L/B	1	1,5	2	3	5	10	20	infinito
Z/B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,2	-	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
0,4	-	0,29	0,31	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34
0,6	-	0,37	0,4	0,42	0,45	0,45	0,46	0,46	0,46
0,8	-	0,44	0,47	0,5	0,53	0,56	0,57	0,57	0,57
1	-	0,49	0,53	0,57	0,61	0,64	0,67	0,67	0,67
1,5	-	0,58	0,65	0,7	0,75	0,81	0,86	0,87	0,87
2	-	0,64	0,72	0,78	0,85	0,93	1	1,23	1,24
3	-	0,7	0,82	0,89	0,99	1,09	1,2	1,25	1,25
4	-	0,74	0,87	0,96	1,07	1,19	1,33	1,43	1,45
5	-	0,76	0,9	1,09	1,13	1,27	1,43	1,54	1,55
6	-	0,78	0,93	1,03	1,17	1,33	1,58	1,68	1,71
8	-	0,8	0,95	1,09	1,23	1,4	1,61	1,75	1,89
10	-	0,81	0,97	1,09	1,26	1,45	1,68	1,85	2,03
14	-	0,82	0,98	1,11	1,29	1,5	1,79	2	2,25
20	-	0,82	0,98	1,12	1,32	1,57	1,89	2,12	2,48

2.2 TEPEDINO (1980)

O método proposto por Tepedino (1980) baseia-se em correlações empíricas entre o ensaio SPT e o coeficiente de reação vertical do solo (Kv). O autor estabelece as equações (4) e (5), para argilas e solos argilosos e para areias e solos arenosos, respectivamente para determinação do KV:

$$K_v = 300 * NSPT \quad (4)$$

$$K_v = 500 * NSPT \quad (5)$$

Onde NSPT é o número de golpes registrados na cravação dos 30 cm finais do amostrador no ensaio SPT.

2.3 MORRISON (1993)

No método proposto por Morrison (1993), o coeficiente de reação vertical do solo (Kv) é obtido a partir da tensão admissível do solo previamente determinada para o perfil geotécnico da região. Dessa forma, o valor de tensão admissível do solo serve como parâmetro de entrada para a correlação empírica utilizada pelo autor, conforme mostrado na Tabela 2, permitindo estimar a rigidez vertical equivalente do solo e, consequentemente, representar sua deformabilidade no modelo de interação solo–estrutura.

Tabela 2 – Valores adotados por Morrison de coeficiente de mola vertical com base na tensão admissível, adaptado de MORRISON (1993).

Tensão admissível (kgf/cm²)	Kv (tnf/m³)	Tensão admissível (kgf/cm²)	Kv (tnf/m³)	Tensão admissível (kgf/cm²)	Kv (tnf/m³)
0,25	650	1,55	3190	2,85	5700
0,3	780	1,6	3280	2,9	5800
0,35	910	1,65	3370	2,95	5900
0,4	1040	1,7	3460	3	6000
0,45	1170	1,75	3550	3,05	6100
0,5	1300	1,8	3640	3,1	6200
0,55	1430	1,85	3730	3,15	6300
0,6	1560	1,9	3820	3,2	6400
0,65	1570	1,95	3910	3,25	6500
0,7	1660	2	4000	3,3	6600
0,75	1750	2,05	4100	3,35	6700
0,8	1840	2,1	4200	3,4	6800
0,85	1930	2,15	4300	3,45	6900
0,9	2020	2,2	4400	3,5	7000
0,96	2110	2,25	4500	3,55	7100
1	2200	2,3	4600	3,6	7200
1,05	2290	2,35	4700	3,65	7300
1,1	2380	2,4	4800	3,7	7400
1,15	2470	2,45	4900	3,75	7500
1,2	2560	2,5	5000	3,8	7600
1,25	2650	2,55	5100	3,85	7700
1,3	2740	2,6	5200	3,9	7800
1,35	2830	2,65	5300	3,95	7900
1,4	2920	2,7	5400	4	8000
1,45	3010	2,75	5500	–	–
1,5	3100	2,8	5600	–	–

O coeficiente de Winkler foi calculado para cada método analisado. Para determinação do coeficiente de reação horizontal (Kh), foi adotado 20% do valor encontrado para o coeficiente de reação vertical do solo (Kv), recomendado por Reale Dias (2013). Além disso, visto que o dimensionamento da estrutura foi realizado pelo SAP2000 v25 (COMPUTERS AND STRUCTURES INC., 2023), software utilizado para modelos finitos, foi determinado o Kh a cada nó da estrutura, visto que a mesma foi discretizada em várias "placas" de 30x30cm, a fim de obter a matriz de rigidez.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos coeficientes de mola obtidos pelos métodos utilizados estão apresentados na Tabela 3. A análise comparativa entre os métodos de Piancastelli (2012), Tepedino (1980) e Morrison (1993) evidenciou diferenças significativas no comportamento estrutural e geotécnico das fundações modeladas. Os resultados de momentos fletores, deslocamentos e tensões de contato permitiram visualizar como a variação do coeficiente de reação vertical do solo influencia na rigidez global do sistema solo–estrutura, conforme pode ser percebido nas Figuras 2 a 4.

Tabela 3 – Valores utilizados para coeficiente de mola nos 3 métodos a serem analisados, autoria própria.

	Morrison (1993)	**Tepedino (1980)**
Kv (tnf/m³)	2200	2500
Kh (tnf/m³)	440	500
Kh nó (tnf/m³)	9,90	11,25
	Radier - Piancastelli (2012)	**Sapata - Piancastelli (2012)**
Kv (tnf/m³)	347	765
Kh (tnf/m³)	69,4	153,1
Kh nó (tnf/m³)	1,56	3,44

Os valores de momento fletor demonstraram que o radier é a fundação mais sensível à variação de rigidez fornecida pelos três métodos. O método de Piancastelli (2012) apresentou o maior momento fletor no radier, atingindo aproximadamente 4,55 tf*m, refletindo maior concentração de esforços internos decorrente da maior rigidez atribuída ao solo, como pode ser visto pela Figura 2. Para as sapatas, os momentos permaneceram praticamente constantes, com valores próximos de 2,86 tf*m em todos os métodos. Esse comportamento uniforme indica que a sensibilidade das sapatas aos diferentes valores de Kv é menor do que no radier, sugerindo que para fundações isoladas, a variação da rigidez do solo exerce influência mais limitada neste tipo de solicitação.

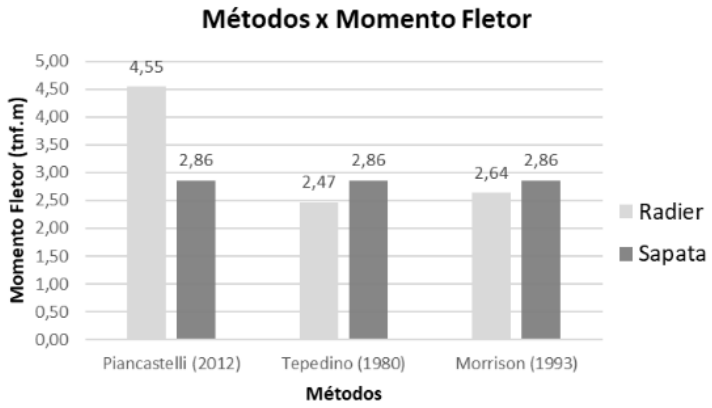


Figura 2 – Valores obtidos com base no dimensionamento da estrutura para os três métodos, autoria própria.

Para os deslocamentos verticais (ver Figura 3), ficou evidente a maior discrepância entre os métodos avaliados. O método de Piancastelli (2012) apresentou os maiores deslocamentos para os dois tipos de fundações, com valores de 5,08 mm para o radier e 11,00 mm para a sapata. Esses resultados indicam que, apesar de Piancastelli (2012) gerar maiores momentos fletores no radier, sua formulação para Kv resulta em valores que indicam uma fundação mais deformável, especialmente no caso das sapatas. Os outros métodos apresentaram deslocamentos significativamente menores. Tepedino (1980) registrou deslocamentos mínimos, variando entre 1,00 e 1,85 mm, enquanto Morrison (1993) apresentou valores intermediários, entre 1,08 e 2,08 mm. Esses resultados mostram que estes métodos tendem a representar um solo mais rígido, reduzindo a deformação vertical e tornando o sistema estrutural menos suscetível a recalques. A diferença entre os valores resultantes da aplica destes métodos destaca a importância da escolha de Kv na avaliação de desempenho, especialmente quando limites de deslocamento controlam o dimensionamento ou o funcionamento operacional da estrutura.

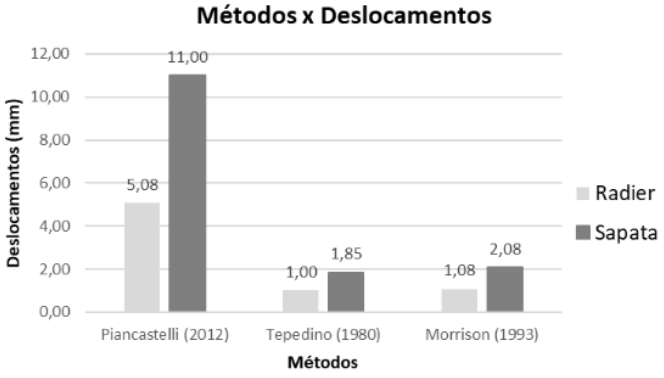


Figura 3 – Valores obtidos com base no dimensionamento da estrutura para os três métodos, autoria própria.

A comparação das tensões atuantes revela comportamento distinto entre radier e sapatas, como pode ser percebido pela Figura 4. Para as sapatas, as tensões permaneceram constantes em 0,49 kgf/cm² de acordo com todos os métodos utilizados, evidenciando que a área reduzida de contato e a aplicação direta das cargas tornam

a tensão média praticamente independente da rigidez do solo. No radier, entretanto, verificou-se maior sensibilidade. O método de Piancastelli (2012) apresentou a menor tensão mobilizada (0,154 kgf/cm²), refletindo maior deformabilidade e melhor distribuição de carga ao longo da fundação. Já os métodos de Tepedino (1980) e Morrison (1993) apresentaram valores mais elevados, de 0,238 e 0,224 kgf/cm², respectivamente. Esses resultados mostram que coeficientes de mola mais rígidos tendem a aumentar a concentração de tensões no radier, alterando diretamente o comportamento geotécnico da fundação.

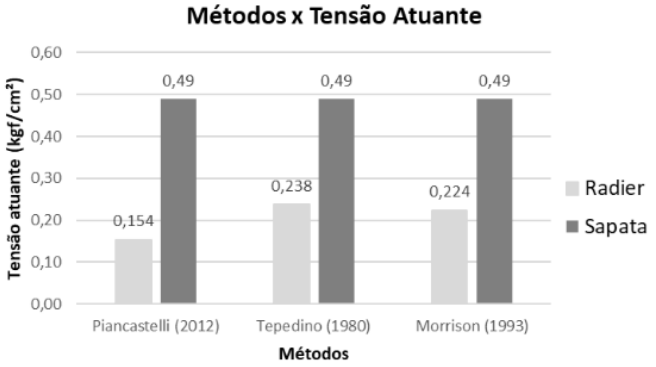


Tabela 6 – Valores obtidos com base no dimensionamento da estrutura para os três métodos, autoria própria.

4 CONCLUSÕES

Os resultados evidenciam diferenças expressivas nos valores dos deslocamentos, nas tensões de contato e nas envoltórias de esforços internos, indicando que métodos empíricos tendem a representar um solo mais deformável, enquanto o método teórico apresenta rigidez significativamente maior. Verificou-se também que essas diferenças impactam diretamente o comportamento estrutural e geotécnico da obra, podendo modificar as verificações de desempenho, a redistribuição de esforços entre pilares e a própria segurança da fundação. Dessa forma, a seleção do método utilizado para determinar o coeficiente de Winkler revela-se essencial para garantir análises mais realistas, seguras e coerentes com as condições de projeto.

A análise dos resultados mostra que a seleção do coeficiente de reação vertical do solo exerce impacto direto na previsão do desempenho estrutural e geotécnico das fundações, no caso, sapatas e radiers. O método de Piancastelli (2012), por apresentar menor valor de rigidez, resultou na previsão de maiores deslocamentos, menor tensão no radier e maior momento fletor, enquanto os métodos de Tepedino (1980) e Morrison (1993) forneceram previsões de comportamento mais rígido, com menores deslocamentos e tensões mais elevadas. A diferença entre as respostas do radier e das sapatas demonstra que fundações contínuas são mais sensíveis à variação de Kv, especialmente em termos de esforços internos e distribuição de tensões.

Com base nos resultados obtidos e na análise comparativa dos métodos de determinação do coeficiente de reação vertical do solo, algumas recomendações podem ser estabelecidas para orientar aplicações práticas e estudos futuros:

- A determinação do coeficiente de Winkler deve ser realizada com cautela, considerando não apenas a facilidade de aplicação dos métodos, mas também a representatividade das condições geotécnicas locais. Recomenda-se que o valor de Kv não seja assumido unicamente por correlações empíricas sem uma verificação mínima com parâmetros do solo obtidos em campo ou laboratório.
- Para projetos em que as deformações admissíveis constituem o critério mais relevante, recomenda-se analisar o método de Piancastelli (2012) com atenção especial, pois este tende a fornecer valores mais elevados de recalque e maior sensibilidade à deformabilidade do solo. Esse método se mostra adequado em estudos que buscam avaliar cenários mais críticos de deslocamento.
- Os métodos de Tepedino (1980) e Morrison (1993) apresentaram respostas semelhantes e menor sensibilidade às variações em relação ao tipo de fundação (se sapata ou radier), sendo adequados para análises preliminares, simulações iniciais e projetos em que a rigidez do solo já é conhecida ou possui baixa variabilidade.

- A escolha do método de obtenção de Kv deve ser acompanhada de uma análise comparativa entre diferentes abordagens, de modo a evitar que a adoção de um único valor resulte em subestimação ou superestimação dos esforços internos. A realização de análises paralelas aumenta a confiabilidade do dimensionamento e possibilita identificar tendências no comportamento da fundação.
- Para empreendimentos industriais, onde recalques diferenciais podem comprometer equipamentos e processos, recomenda-se que a análise estrutural considere valores conservadores de Kv e cenários alternativos de rigidez, garantindo maior margem de segurança no dimensionamento final.
- Estudos futuros podem incluir a incorporação de modelos de interação solo–estrutura mais avançados, considerando não linearidade do solo, variabilidade espacial do NSPT e efeitos tridimensionais na distribuição de tensões. A comparação entre o modelo de Winkler e abordagens contínuas, como modelos elastoplásticos ou mecanismos baseados em MEF geotécnico, pode complementar a análise apresentada.
- Recomenda-se também ampliar a base de dados de sondagens e ensaios de campo, de modo que os métodos de determinação de Kv possam ser calibrados para as condições específicas do terreno. Isso permite reduzir incertezas e melhorar a precisão das estimativas de deformabilidade utilizadas nas simulações estruturais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Engenharia do CREA-SP pela realização do evento e ao Geotecnia Brasil pela ampla divulgação de informações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBIEIRO, José Humberto; CINTRA, José Carlos Azevedo. Fundações superficiais. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

BOWLES, Joseph E. Foundation analysis and design. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1997.

CASELUNGHE, A.; ERIKSSON, J. Structural element approaches for soil-structure interaction. 2012.

COMPUTERS AND STRUCTURES, INC. SAP2000: Integrated software for structural analysis and design. Version 25. Berkeley: Computers and Structures, Inc., 2023.

MORRISON, N. Interacción suelo-estructuras: semi-espacio de Winkler. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 1993.

PIANCASTELLI, É. M. Tópicos em estruturas de fundação e contenção. Belo Horizonte: SEI Engenharia de Projetos Ltda., 2012.

REALE, C.; DIAS, J. Winkler spring stiffness distribution for the structural analysis of foundations. International Journal of Geomechanics, v. 13, n. 6, p. 769–780, 2013.

TEPEDINO, J. M. Curso de especialização: notas de aula. s.l.: s.n., 1980.