

ANÁLISE DE VIGAS SOBRE BASE ELÁSTICA CONSIDERANDO A INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

Antônio Vitor Barbosa Fernandes¹

Vinicius Costa Correia²

Engenharia Civil



cadernos de
graduação

ciências exatas e tecnológicas

ISSN IMPRESSO 1980-1777

ISSN ELETRÔNICO 2316-3135

RESUMO

As vigas baldrame são elementos estruturais muito presentes na engenharia, e ainda hoje, a análise deste tipo de estrutura é feita considerando a hipótese simplificada, em que a viga é considerada aérea, ignorando a presença de uma superfície deformável sob ela. Porém, com o avanço da tecnologia é possível fazer análises mais precisas, em que uma viga é posta sobre molas lineares presentes em toda extensão da viga, formando uma base elástica, segundo a teoria de Winkler. A forma como uma estrutura reage às solicitações ao ser submetida a um carregamento externo, em condições particulares do solo em que ela se apoia é denominada de interação solo-estrutura. Com o intuito de contribuir com o tema, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de vigas baldrame considerando a interação solo-estrutura, obtendo os valores das reações de apoio, forças cortantes, momento fletor e reações das molas, através de um *software* de modelagem de pórticos planos, o Ftool. Foram desenvolvidos oito exemplos com o intuito de identificar as alterações dos esforços internos ocasionadas ao se considerar a interação solo-estrutura, a partir da variação do tipo de solo utilizado. A fim de facilitar os estudos, foram consideradas vigas com as mesmas características geométricas e de carregamento. Para cada tipo de solo, foi possível analisar com bastante propriedade a redistribuição dos esforços ao longo das vigas. Foi possível concluir com os resultados obtidos neste estudo, que ocorre uma redistribuição dos esforços ao longo da viga, com diferenças significativas para os solos mais resistentes em relação aos menos resistentes. Ainda que a consideração da interação solo-estrutura seja feita de forma simplificada, este trabalho ressalta a importância desta consideração. Para uma análise estrutural mais precisa e realista, recomenda-se que a interação solo-estrutura seja considerada em qualquer situação em que se tenha o contato da estrutura ou parte dela com o solo.

PALAVRAS-CHAVE

Viga baldrame. Base elástica. Interação solo-estrutura. Ftool.

ABSTRACT

Grade beams are very applied in many structural engineering projects, and even today, the analysis of this type of structure is made by considering the simplified hypothesis, in which the beam is assumed as aerial, ignoring the presence of a deformable surface under it. However, with the advancement of technology it is possible to make more precise analyzes, in which linear springs are placed underneath the beam, following all its extension, forming an elastic basis, according to Winkler's theory. The way a structure reacts to an external load, under particular conditions of the soil on which it is based, is termed as soil-structure interaction. In order to contribute with this topic, this work has the objective to analyze the behavior of grade beams considering the soil-structure interaction, obtaining the values of the support reactions, shear forces, bending moment and spring reactions, through the modeling software of flat porticoes Ftool. Eight examples were developed in order to identify the changes in the internal loads caused by considering the soil-structure interaction, based on the variation of the type of soil. In order to facilitate the studies, it was considered beams with the same geometric and loading characteristics. For each type of soil, it was possible to analyze quite properly the redistribution of the forces along the beams. It was possible to conclude with the results that a redistribution of the efforts along the beam occurs, with significant differences for the more resistant soils compared to the less resistant ones. Although the consideration of the soil-structure interaction is made in a simplified way, this work highlights the importance of this consideration. For a more accurate and realistic structural analysis, it is recommended that soil-structure interaction be considered in any situation where the structure or part of the structure is in contact with the soil.

KEYWORDS

Grade Beam. Elastic Basis. Soil-Structure Interaction. Ftool

1 INTRODUÇÃO

Ainda hoje, as vigas baldrames, ou seja, vigas apoiadas sobre uma base elástica são calculadas considerando a hipótese simplificada, em que a viga é considerada aérea, ignorando a presença de uma superfície deformável sob ela. Essas simplificações ocorrem pelo fato de inexistir uma metodologia precisa e de um *software* capaz de unir tecnologia e praticidade na modelagem de estruturas mais compatíveis com a

realidade. Ainda que fosse simplista, essa hipótese impulsionou importantes avanços, especialmente em uma época em que não existiam computadores.

Deste modo, considerações importantes como a interação solo-estrutura acabam sendo negligenciadas, logo, tem sido um desafio encontrar projetos estruturais em que seja levada em conta esta interação. A interação solo-estrutura nada mais é que a maneira que estrutura reage às solicitações ao ser submetida a um carregamento externo, em condições particulares do solo em que ela se apoia.

Uma vantagem em considerar a interação solo-estrutura é a oportunidade de estabelecer os efeitos da redistribuição de esforços nas vigas, a forma e a intensidade dos recalques diferenciais, tornando a modelagem mais eficiente e confiável.

No âmbito da tecnologia, um dos *softwares* que vem se tornando destaque na engenharia, seja ela no meio acadêmico ou até mesmo profissional é o Ftool, que nada mais é que um sistema gráfico interativo cujo principal objetivo é oferecer ao usuário uma ferramenta para modelar e aprender o comportamento de uma estrutura de pórticos planos. Além de ser uma ferramenta computacional poderosa, ela pode ser baixada por qualquer um de forma gratuita, fato este que explica a ascensão e o grande número de usuários do *software*.

Com a pretensão de contribuir para cobrir esta lacuna deixada, seguindo as orientações das normas técnicas vigentes e de algumas publicações clássicas de cunho semelhante. Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de vigas baldrame considerando a interação solo-estrutura, obtendo os valores das reações de apoio, forças cortantes, momento fletores e reações das molas, comparando-os entre 8 situações diferentes através do *software* de modelagem de pórticos planos, o Ftool. Devido à boa aproximação em relação ao comportamento real, este tipo de análise otimiza os sistemas de engenharia, o que é essencial para a elaboração de projetos mais competitivos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

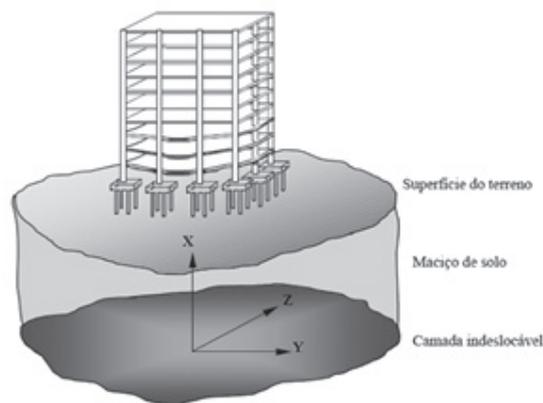
A interação solo-estrutura é o método de análise estrutural em que a estrutura reage às solicitações ao ser submetida a um carregamento externo, levando em consideração as condições particulares do contato com o solo.

Segundo Iwamoto (2000), os primeiros estudos no Brasil sobre o problema, foram feitos por Chamecki (1956) e posteriormente aplicado para o problema do adensamento do solo. Como a preocupação era com as medidas de recalques de edifícios altos, pouco se tinha estudado os problemas de redistribuição dos esforços na estrutura e a alteração dos recalques na fundação com a interação solo – estrutura, até a década de 80. Por ser um tema relativamente novo, somente em novembro de 1994 no COBRAMSEF, ocorrida em Foz do Iguaçu que foi incluída a sessão técnica de “Fundações e Interação Solo – Estrutura.

A condução de uma análise mais ajustada à realidade física, considerando a deformabilidade do solo, tem sido efetuada apenas em escritórios de alto nível e, mesmo nestes casos, as investigações são feitas apenas para os casos julgados especiais. Este tipo de análise deve ser realizada mediante a parceria dos engenheiros de estruturas com os engenheiros de fundações ou geotécnicos (SOUZA; REIS, 2008).

A modelagem de uma estrutura levando em conta a interação solo-estrutura requer do projetista uma visão globalizada dos diferentes materiais que integram o conjunto, isto é, sistemas estruturais mais sistemas geotécnicos ou maciço de solo, segundo a Figura 1. Sendo que o maciço de solo é um conjunto composto por certo número de elementos de solos que sempre envolvem o espaço físico traçado pela área do terreno e a superfície do indeslocável (IWAMOTO, 2000).

Figura 1 – Sistema de referência do indeslocável



Fonte: Iwamoto (2000).

2.2 BASE ELÁSTICA

A importância da resposta da base elástica está intimamente ligada à obtenção das reações na superfície de contato com a estrutura, trazendo o campo de deslocamento que se propaga no seu interior. A maior parte dos modelos é desenvolvida, em que pequenas molas são postas no sentido de possibilitarem reação ao deslocamento da estrutura, podendo essa reação ter comportamento linear ou não linear (MACHADO, 2013).

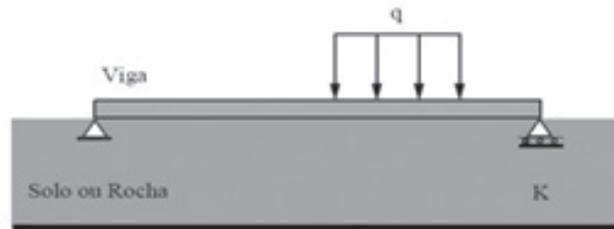
A seguir, são apresentados os modelos de base elástica citados no parágrafo anterior.

2.2.1 Modelos para bases elásticas

A base elástica (solo) é um meio contínuo, como pode ser ilustrado na Figura 2. Como o objetivo nesta pesquisa é obter os esforços internos de uma viga apenas na superfície de contato entre a estrutura e a base, é possível representá-la

com modelos matemáticos simples. Deste modo, a reação da base pode ser representada genericamente mediante os modelos propostos a seguir.

Figura 2 – Viga em contato com uma base elástica (solo)



Fonte: Abreu (2016).

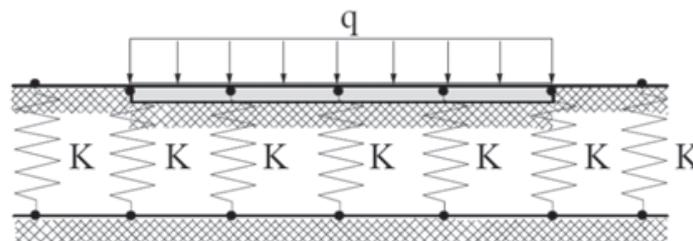
a) Modelo de Molas Discretas

Este conceito é representado por um conjunto de apoios discretos formados por molas, em que a viga fica em contato com as mesmas. As molas representam o meio elástico contínuo (solo), como ilustrado na Figura 3. A reação de cada mola é dada por:

$$r_b = Kw_b |_{xi}$$

Em que r_b e w_b são, respectivamente, a reação e o deslocamento da base elástica, K corresponde ao parâmetro de rigidez da mola na posição x_i , que indica o ponto da estrutura e da base elástica que estão em contato (PEREIRA, 2003).

Figura 3 – Modelo de molas discretas



Fonte: Silva (1998).

b) Modelo de Winkler

Este modelo é similar a uma camada formada por molas estreitamente espaçadas e independentes entre si. Por esse modelo não representar de forma apropriada algumas das características de muitas fundações, não se considera a interação entre as molas (PEREIRA, 2003).

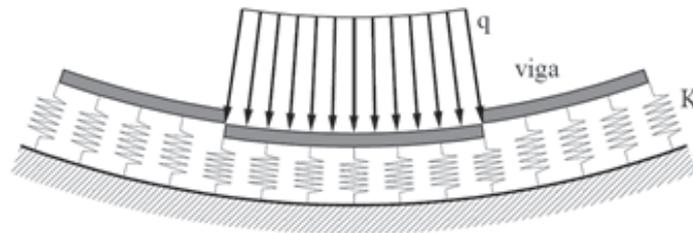
Para Maciel (2012), trata-se de um modelo matemático bastante utilizado por pesquisadores e engenheiros para aproximar o comportamento da base elástica.

Segundo o Machado (2013), o modelo de Winkler, que está denotado na Figura 4, possui apenas um parâmetro para definir as propriedades do material que compõem a base elástica. A concepção deste modelo assume que a intensidade da reação normal r_b em um certo ponto da base elástica é diretamente proporcional à deflexão w_b que se dá nesse ponto, isto é:

$$r_b = K w_b$$

Respectivamente K e w_b correspondem ao parâmetro de rigidez da mola e o deslocamento da base elástica.

Figura 4 – Modelo de Winkler



Fonte: Machado (2013).

2.3 COEFICIENTE DE REAÇÃO VERTICAL

O conhecimento das características do solo do local onde será construído o empreendimento se faz muito importante, pois, com esse conhecimento pode-se modelar uma estrutura com mais fidelidade à realidade. É por meio destes dados que se torna possível a simulação da interação solo-estrutura nos modelos estruturais, aplicando mola para retratar a deformabilidade do solo ou estimando deslocamento para simular os efeitos de recalques (ANTONIAZZI, 2011).

O coeficiente de reação vertical, também conhecido como módulo de reação vertical, coeficiente de mola, coeficiente de proporcionalidade e coeficiente de recalque é descrito como a pressão por unidade de área da região de contato entre uma viga ou uma placa carregada e o solo em que se apoia. O coeficiente de reação vertical do solo k_v é a razão entre a pressão p_r em qualquer ponto da região de contato e o deslocamento vertical w gerado devido a aplicação da carga, de acordo com a equação 3 (CHRISTAN, 2012).

$$k_v = \frac{p_r}{w}$$

Segundo Antoniazzi (2011), o módulo de reação k_v não integra uma propriedade do solo, mas está ligado a inúmeros fatores como a forma e a dimensão da fundação, o tipo de construção e flutuações de carregamento. Como

o valor de k_v depende das propriedades elásticas do solo e das dimensões da região carregada, a sua estimativa envolve muitas incertezas.

2.4 COEFICIENTE DE MOLA

Para a aplicação de molas sob a base da estrutura deve-se conhecer o coeficiente de reação vertical, o qual irá equivaler à deformabilidade do solo. Ele é similar ao coeficiente de mola, mas não relacionado a uma força e sim a uma pressão (ANTONIAZZI, 2011).

É possível relacionar por meio do modelo de Winkler o coeficiente de reação vertical solo com o coeficiente de mola (K_V), por meio da relação indicada na equação a seguir:

$$K_V = k_v \cdot A_{infl}$$

Em que k_v é o coeficiente de reação vertical e A_{infl} é área de influência da mola. O coeficiente de mola geralmente é expresso em kN/m ou em tf/m.

Para determinar a área de influência de cada mola pode ser realizada uma subdivisão da viga em n trechos de comprimento "a" e a disposição no centro de cada trecho uma mola com seu respectivo valor (COSTA, 1998).

3 METODOLOGIA

3.1 DEFINIÇÃO DA CARACTERÍSTICA DA VIGA, DA CARGA ATUANTE E DO SOLO

Para as análises foi utilizada, como exemplo, uma viga simplesmente apoiada, isolada. Como o objetivo do estudo e o comportamento da estrutura, foram utilizadas seção transversal e material qualquer. O carregamento considerado atuante na viga foi a carga vertical no sentido da gravidade.

Para o solo foram utilizadas sete situações diferentes (solo pantanoso, aterro de silte, argila úmida, argila seca endurecida, silte compactado com areia e muita pedra, cascalho grosso com areia grossa, cascalho grosso com pouca areia compactada).

As propriedades geotécnicas utilizadas nos exemplos foram determinadas por meio de relações empíricas existentes na literatura, obtendo os valores do coeficiente de reação vertical (k_v) e em seguida obtido os valores do coeficiente de mola (K_V)

3.2 CONSIDERAÇÕES PARA A INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

O solo foi substituído por um sistema independente, com molas linearmente elásticas espaçadas entre si, conhecido como modelo de Winkler, essa situação adi-

ciona uma característica ao problema: a constante de rigidez da mola, que representa o efeito do solo na viga. Tendo em vista que a determinação dos parâmetros de rigidez do solo seja bastante complicado, foi utilizado o coeficiente de reação vertical de valores padronizados. Apesar de não ser a melhor solução, facilita o cálculo e traz uma modelagem que condiz melhor com a realidade.

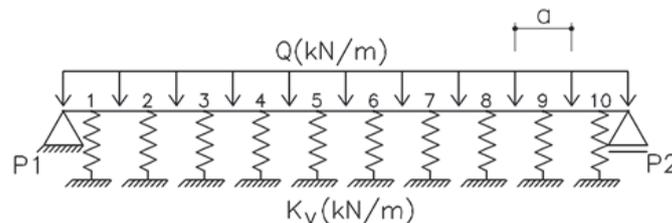
3.4 ELABORAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO NO *SOFTWARE FTOOL*

Neste trabalho foi utilizado para as análises o *software* de análise estrutural Ftool, que tem como seu principal objetivo simular estruturas em pórticos planos.

Para simular o comportamento de uma viga apoiada sobre um meio elástico K_v deve-se seguir as seguintes etapas:

a) Divide-se a viga, que se está querendo calcular, em várias seções de no máximo $a = 0,50$ m de comprimento e largura qualquer b_w (FIGURA 5).

Figura 5 – Esquema estático de uma viga apoiada em meio elástico submetido a carga da parede Q (kN/m)



Fonte: Autores (2019).

a) A cada nó dessa divisão, se associa um trecho de solo também de comprimento "a" e largura b_w ;

b) Trocam-se todos os elementos de solo de comprimento a (S1 a S10) e no meio de cada seção "a" são inseridas molas, considerando nos pontos restrição à translação nas direções dos eixos x e z. O coeficiente de mola (kN/m) foi calculado pela equação:

$$K_V = k_v \cdot A_{infl}$$

Em que:

k_v é o coeficiente de reação vertical (kN/m³);

A_{infl} é área de influência da mola (m²).

A área de influência é o produto do comprimento "a" e a largura da viga b_w em metros.

c) Alimenta-se o Ftool com a carga, seção da viga, coeficiente de mola e em seguida roda-se o programa, obtendo-se os valores do momento máximo (kN.m), Força cortante (kN) e as reações de apoio (kN).

3.5 ANÁLISE E COLETA DE DADOS

Foram feitos oito exemplos para complementar a pesquisa e demonstrar seus diferentes resultados a partir da variação do tipo de solo utilizado. O foco deste trabalho é conhecer os diferentes tipos de comportamento das vigas em determinados tipos de solo. A fim de facilitar os estudos, foram consideradas vigas com as mesmas características geométricas (seção 20x40cm), comprimento de vão ($l=5,0m$), condições de apoio (bi-apoiada) e carregamento (10,0 kN/m), com essas considerações foi possível analisar com bastante propriedade as vigas baldrames. Em nível de curiosidade foi acrescentado um exemplo de uma viga aérea, ou seja, não apoiada em base elástica, a fim de demonstrar o método de análise tradicional com o método utilizado neste trabalho, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de entrada das vigas exemplo

Viga	Seção (cm)	L (m)	Carga (kN/m)	a (m)	Ainfl (m ²)	Tipo solo	kv (kN/m ³)	KV (kN/m)
1	20x40	5,0	10,0	0,50	0,10	-	-	-
2	20x40	5,0	10,0	0,50	0,10	Solo pantanoso	5.000	500
3	20x40	5,0	10,0	0,50	0,10	Aterro de silte	10.000	1.000
4	20x40	5,0	10,0	0,50	0,10	Argila úmida	40.000	4.000
5	20x40	5,0	10,0	0,50	0,10	Argila seca endurecida	100.000	10.000
6	20x40	5,0	10,0	0,50	0,10	Silte compactado com areia e muita pedra	120.000	12.000
7	20x40	5,0	10,0	0,50	0,10	Cascalho grosso com areia grossa	150.000	15.000
8	20x40	5,0	10,0	0,50	0,10	Cascalho grosso com pouca areia compactada	200.000	20.000

Fonte: Autores (2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo foram feitas as análises dos resultados, mostrando o comportamento da viga em situações diferente de solo, comparando seus resultados.

4.1 MODELOS DE CÁLCULO DO FTOOL

Os itens abaixo mostram os resultados obtidos dos modelos de cálculo, gerados no Ftool, para as oito diferentes situações.

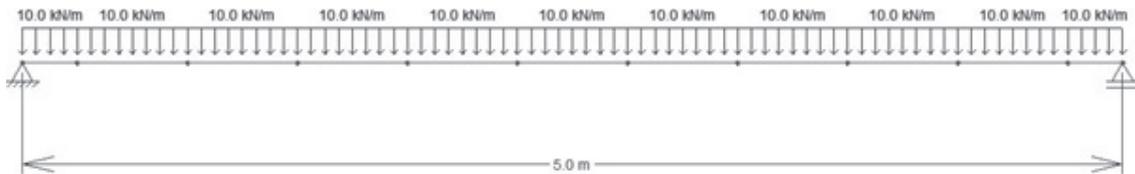
4.1.1 Viga 1 – Aérea

Os resultados para forças cortantes, momentos fletores e reações de apoio da Viga 1, seguem nos itens mostrados abaixo.

a) Dados de entrada no Ftool

A Figura 6 mostra os dados de entrada da viga 1 na plataforma do Ftool.

Figura 6 – Dados de entrada da viga 1

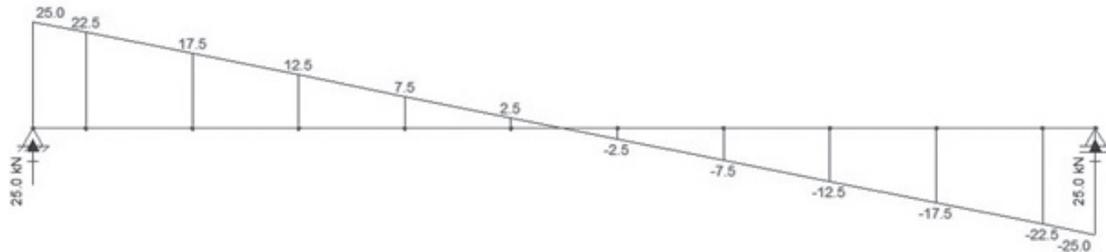


Fonte: Autores (2019).

b) Diagrama de esforço cortante

A Figura 7 mostra os resultados dos esforços cortantes para viga 1.

Figura 7 – Diagrama de esforço cortante (viga aérea)

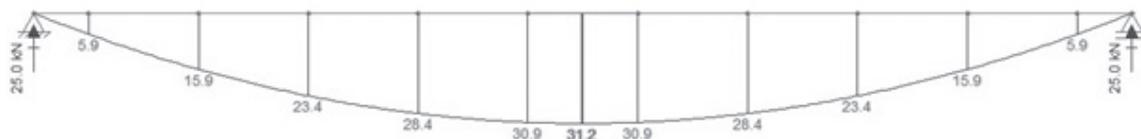


Fonte: Autores (2019).

c) Diagrama de momento fletor

A Figura 8 mostra os resultados dos momentos fletores para viga 1.

Figura 8 – Diagrama de momento fletor (viga aérea)



Fonte: Autores (2019).

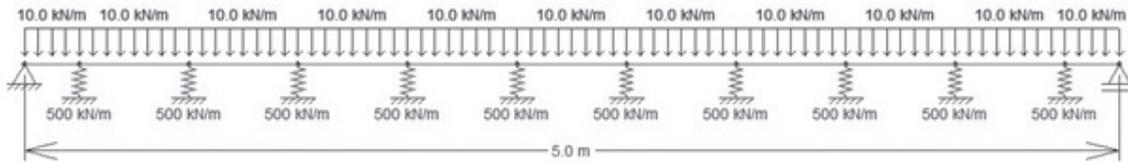
4.1.2 Viga 2 – Solo pantanoso

Os resultados para forças cortantes, momentos fletores, reações de apoio e reações nas molas para o solo pantanoso, seguem nos itens mostrados abaixo.

a) *Dados de entrada no Ftool*

A Figura 9 mostra os dados de entrada da viga 2 na plataforma do *Ftool*.

Figura 9 – Diagrama de esforço cortante (viga aérea)

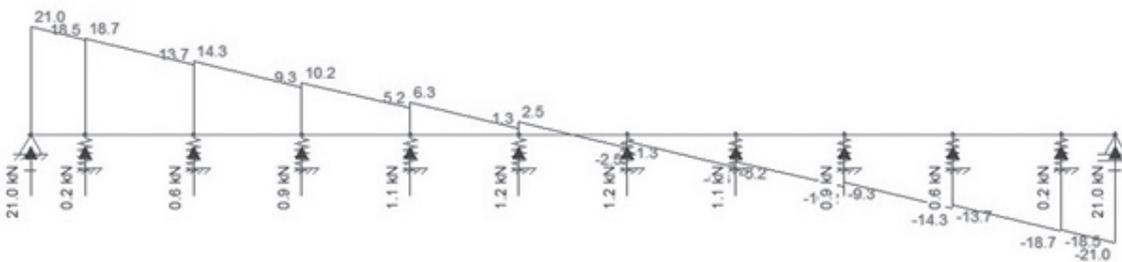


Fonte: Autores (2019).

b) *Diagrama de esforço cortante*

A Figura 10 mostra os resultados dos esforços cortantes para viga 2.

Figura 10 – Diagrama de esforço cortante (solo pantanoso)

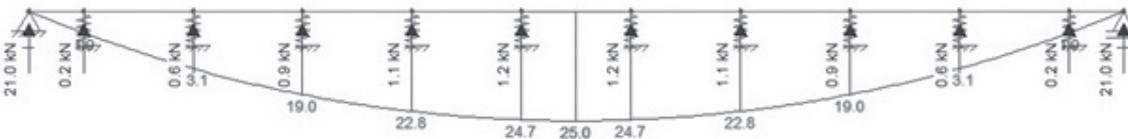


Fonte: Autores (2019).

c) *Diagrama de momento fletor*

A Figura 11 mostra os resultados dos momentos fletores para viga 2.

Figura 11 – Diagrama de momento fletor (solo pantanoso)



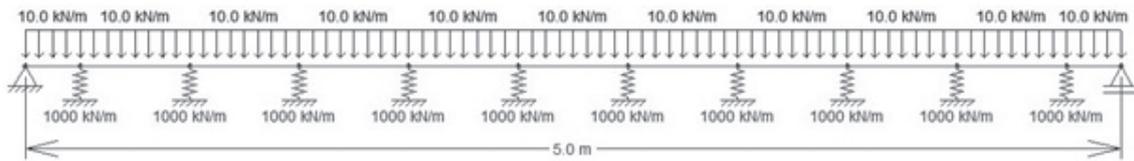
Fonte: Autores (2019).

4.1.3 Viga 3 – Aterro de silte

Os resultados para forças cortantes, momentos fletores, reações de apoio e reações nas molas para o solo de aterro de silte, seguem nos itens mostrados abaixo.

a) *Dados de entrada no Ftool*

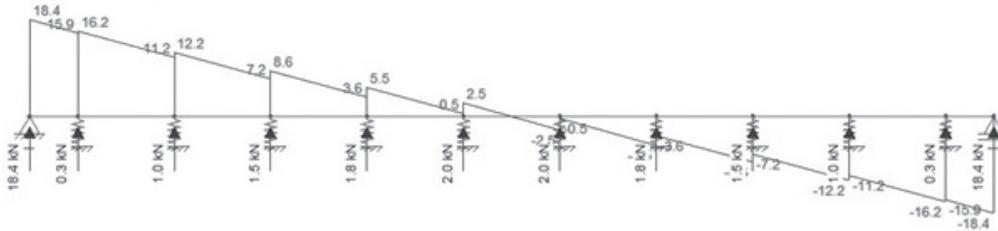
A Figura 12 mostra os dados de entrada da viga 3 na plataforma do *Ftool*.

Figura 12 – Dados de entrada da Viga 3

Fonte: Autores (2019).

b) Diagrama de esforço cortante

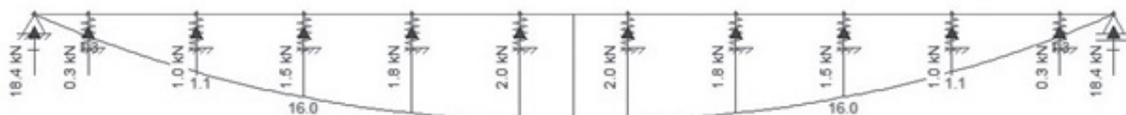
A Figura 13 mostra os resultados dos esforços cortantes para viga 3.

Figura 13 – Diagrama de esforço cortante (solo de aterro de silte)

Fonte: Autores (2019).

c) Diagrama de momento fletor

A Figura 14 mostra os resultados dos momentos fletores para viga 3.

Figura 14 – Diagrama de momento fletor (solo de aterro de silte)

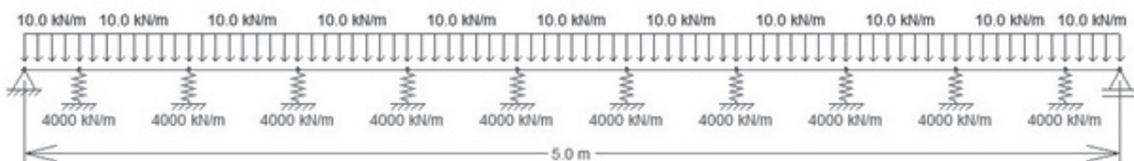
Fonte: Autores (2019).

4.1.4 Viga 4 – Argila úmida

Os resultados para forças cortantes, momentos fletores, reações de apoio e reações nas molas para o solo de argila úmida, seguem nos itens mostrados abaixo.

a) Dados de entrada no Ftool

A Figura 15 mostra os dados de entrada da viga 4 na plataforma do Ftool.

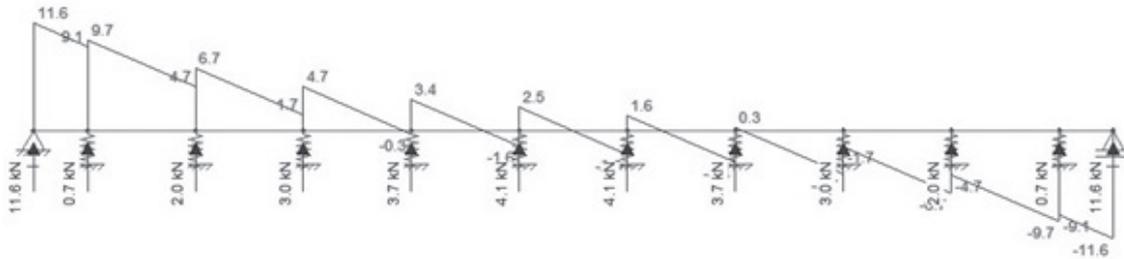
Figura 15 – Dados de entrada da viga 4

Fonte: Autores (2019).

b) Diagrama de esforço cortante

A Figura 16 mostra os resultados dos esforços cortantes para viga 4.

Figura 16 – Diagrama de esforço cortante (solo de argila úmida)

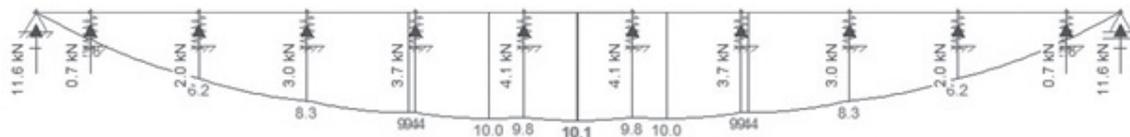


Fonte: Autores (2019).

c) Diagrama de momento fletor

A Figura 17 mostra os resultados dos momentos fletores para viga 4.

Figura 17 – Diagrama de momento fletor (solo de argila úmida)



Fonte: Autores (2019).

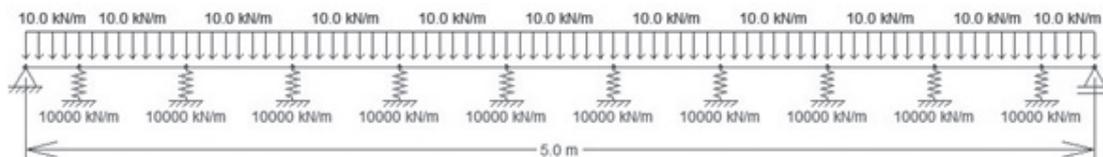
4.1.5 Viga 5 – Argila seca endurecida

Os resultados para forças cortantes, momentos fletores, reações de apoio e reações nas molas para o solo de argila seca endurecida, seguem nos itens mostrados abaixo.

a) Dados de entrada no Ftool

A Figura 18 mostra os dados de entrada da viga 5 na plataforma do Ftool.

Figura 18 – Dados de entrada da viga 5

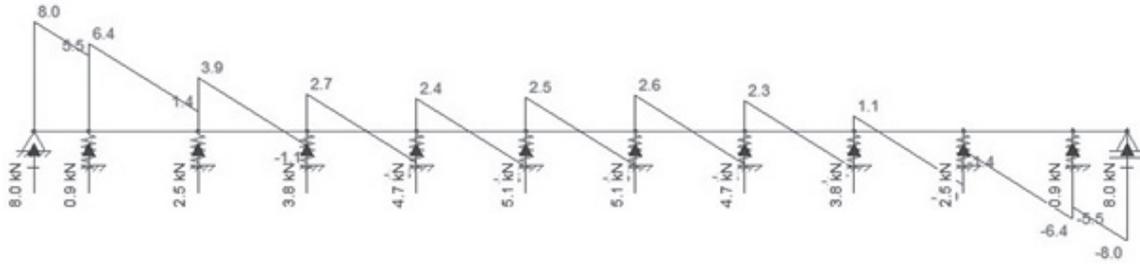


Fonte: Autores (2019).

b) Diagrama de esforço cortante

A Figura 19 mostra os resultados dos esforços cortantes para viga 5.

Figura 19 – Diagrama de esforço cortante (solo de argila seca endurecida)

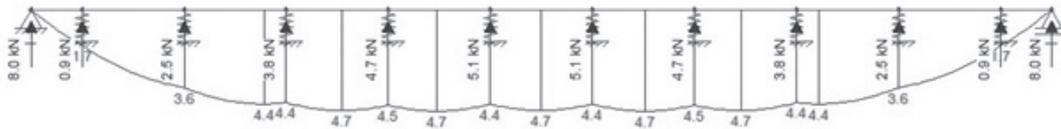


Fonte: Autores (2019).

c) Diagrama de momento fletor

A Figura 20 mostra os resultados dos momentos fletores para viga 5.

Figura 20 – Diagrama de momento fletor (solo de argila seca endurecida)



Fonte: Autores (2019).

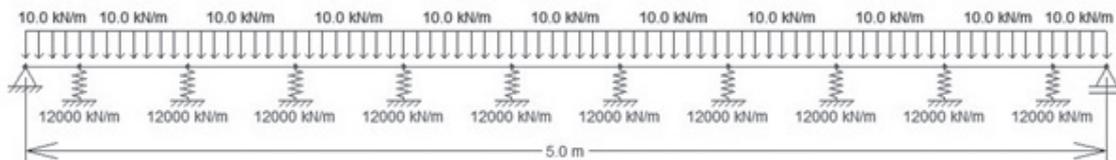
4.1.6 Viga 6 – Silte compactado com areia e muita pedra

Os resultados para forças cortantes, momentos fletores, reações de apoio e reações nas molas para o solo de silte compactado com areia e muita pedra, seguem nos itens mostrados abaixo.

a) Dados de entrada no Ftool

A Figura 21 mostra os dados de entrada da viga 6 na plataforma do Ftool.

Figura 21 – Dados de entrada da viga 6

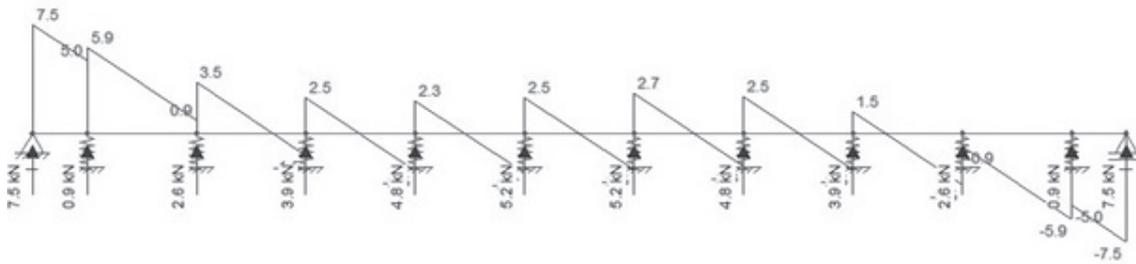


Fonte: Autores (2019).

b) Diagrama de esforço cortante

A Figura 22 mostra os resultados dos esforços cortantes para viga 6.

Figura 22 – Diagrama de esforço cortante (solo de silte compactado com areia e muita pedra)

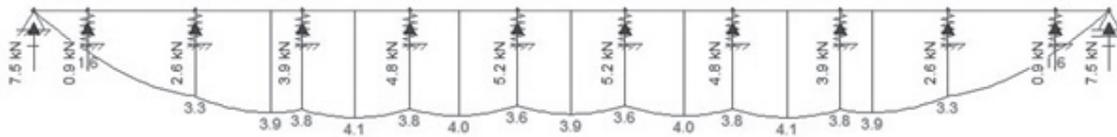


Fonte: Autores (2019).

c) Diagrama de momento fletor

A Figura 23 mostra os resultados dos momentos fletores para viga 6.

Figura 23 – Diagrama de momento fletor (solo de silte compactado com areia e muita pedra)



Fonte: Autores (2019).

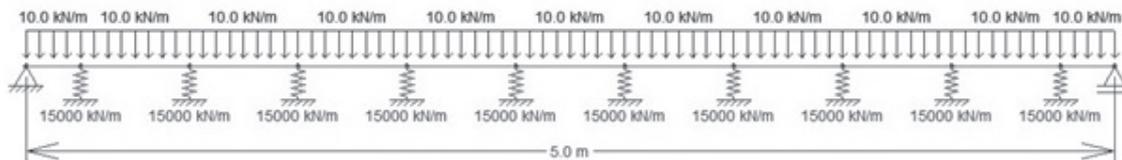
4.1.7 Viga 7 – Cascalho grosso com areia grossa

Os resultados para forças cortantes, momentos fletores, reações de apoio e reações nas molas para o solo de cascalho grosso com areia grossa, seguem nos itens mostrados abaixo.

a) Dados de entrada no Ftool

A Figura 24 mostra os dados de entrada da viga 7 na plataforma do Ftool.

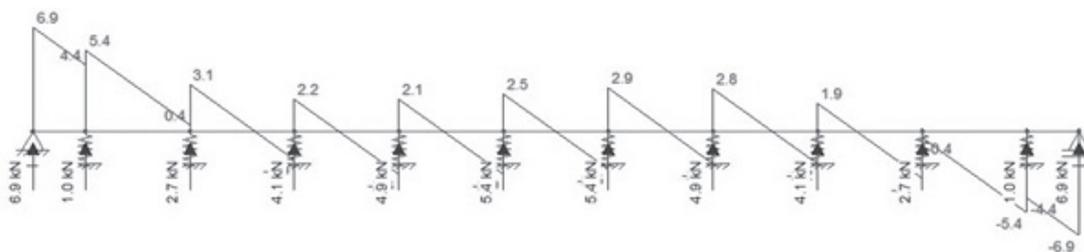
Figura 24 – Dados de entrada da viga 7



Fonte: Autores (2019).

b) Diagrama de esforço cortante

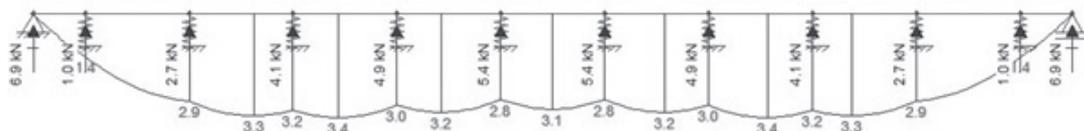
A Figura 25 mostra os resultados dos esforços cortantes para viga 7.

Figura 25 – Diagrama de esforço cortante (solo de cascalho grosso com areia grossa)

Fonte: Autores (2019).

c) Diagrama de momento fletor

A Figura 26 mostra os resultados dos momentos fletores para viga 7.

Figura 26 – Diagrama de momento fletor (solo de cascalho grosso com areia grossa)

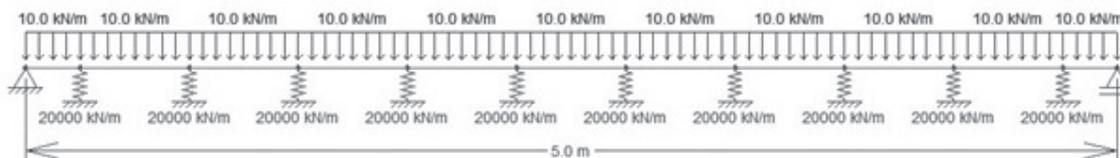
Fonte: Autores (2019).

4.1.8 Viga 8 – Cascalho grosso com pouca areia compactada

Os resultados para forças cortantes, momentos fletores, reações de apoio e reações nas molas para o solo de cascalho grosso com pouca areia compactada, seguem nos itens mostrados abaixo.

a) Dados de entrada no Ftool

A Figura 27 mostra os dados de entrada da viga 8 na plataforma do Ftool.

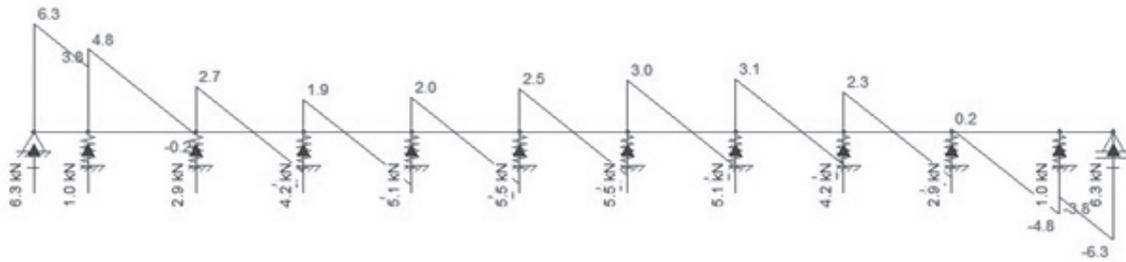
Figura 27 – Dados de entrada da viga 8

Fonte: Autores (2019).

b) Diagrama de esforço cortante

A Figura 28 mostra os resultados dos esforços cortantes para viga 8.

Figura 28 – Diagrama de esforço cortante (solo de cascalho grosso com pouca areia compactada)

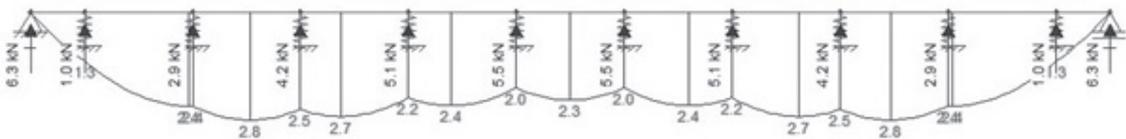


Fonte: Autores (2019).

c) Diagrama de momento fletor

A Figura 29 mostra os resultados dos momentos fletores para viga 8.

Figura 29 – Diagrama de momento fletor (solo de cascalho grosso com pouca areia compactada)



Fonte: Autores (2019).

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS

Com o intuito de analisar e comprovar o método, foram feitas as análises da viga em oito situações diferentes de solo, em que foram obtidos os valores das reações de apoio, força cortante máxima, momento fletor máximo e a reação máxima nas molas. Os resultados estão apresentados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Dados de saída resumidos das vigas exemplo

Viga	Tipo solo	Reação de apoio (kN)	Força cortante máx. (kN)	Momento fletor máx. (kN.m)	Reação máxima nas molas (kN)
1	-	25,0	25,0	31,2	-
2	Solo pantanoso	21,0	21,0	25,0	1,2
3	Aterro de silte	18,4	18,4	20,8	2,0

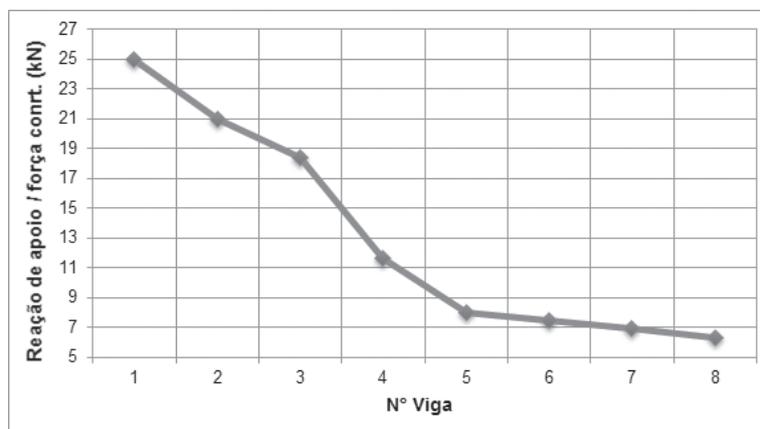
Viga	Tipo solo	Reação de apoio (kN)	Força cortante máx. (kN)	Momento fletor máx. (kN.m)	Reação máxima nas molas (kN)
4	Argila úmida	11,6	11,6	10,1	4,1
5	Argila seca endurecida	8,0	8,0	4,7	5,1
6	Silte compactado com areia e muita pedra	7,5	7,5	4,1	5,2
7	Cascalho grosso com areia grossa	6,9	6,9	3,4	5,4
8	Cascalho grosso com pouca areia compactada	6,3	6,3	2,8	5,5

Fonte: Autores (2019)

Após a realização das análises do comportamento da viga nas oito situações no *software Ftool*, foi possível obter resultados claros e objetivos. Ao alterar o tipo de solo, em que a cada viga foi utilizado um solo mais resistente, ou seja, um coeficiente de reação vertical (k_v) maior, foi possível observar alterações nos dados de saída. Ao se aumentar o valor do k_v , as reações de apoio, a força cortante e o momento fletor máximo diminuem, em contrapartida, as reações das molas aumentam.

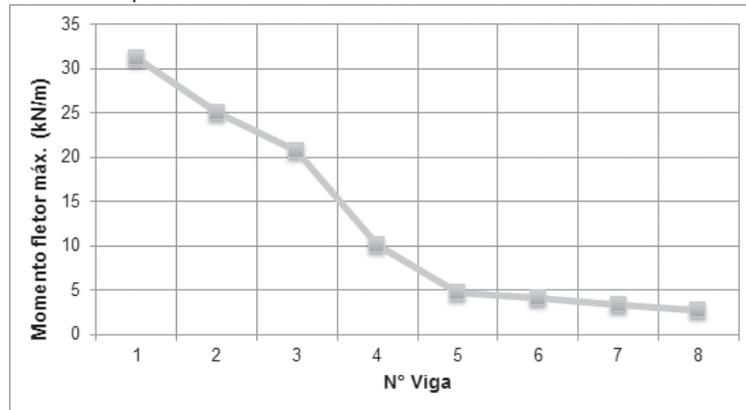
O Gráfico da Figura 30 mostra um comparativo dos resultados obtidos para as reações de apoio e força cortante máxima.

Figura 30 – Gráfico comparativo dos resultados de reações de apoio e força cortante para as vigas



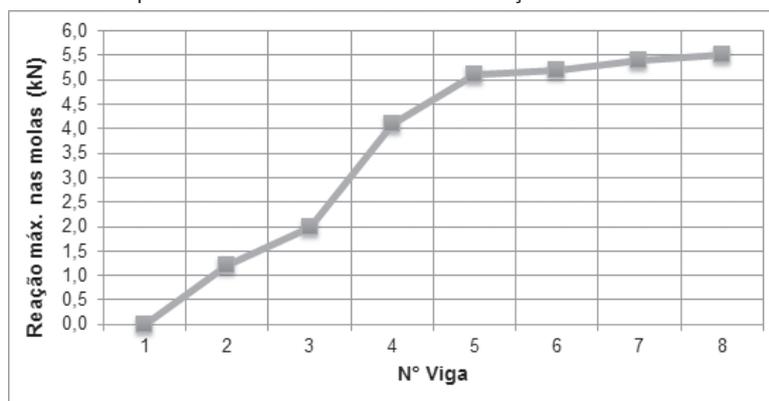
Fonte: Autores (2019).

O Gráfico da Figura 31 mostra um comparativo dos resultados obtidos para os momentos fletores máximos.

Figura 31 – Gráfico comparativo dos resultados de momento fletor máximo para as vigas

Fonte: Autores (2019).

O Gráfico da Figura 32 mostra um comparativo dos resultados obtidos para as reações máximas nas molas.

Figura 32 – Gráfico comparativo dos resultados de reação máxima nas molas para as vigas

Fonte: Autores (2019).

A diminuição dos esforços solicitantes nas vigas se dá por conta da interação solo-estrutura, em que o solo contribui com sua resistência superficial, distribuindo o carregamento com as molas dispostas abaixo da viga. Por isso, quanto maior a resistência do solo, maior a reação máxima das molas, isto é, quanto maior for a resistência do solo, maior a carga que as molas absorvem.

5 CONCLUSÃO

Por meio de uma vasta revisão bibliográfica e de exemplos, o trabalho procurou fornecer contribuição sobre a consideração da interação solo-estrutura em vigas baldrame, visto que o tema ainda é pouco abordado em livros, sendo mais explorado em trabalhos e pesquisas acadêmicas.

A interação solo-estrutura foi considerada a partir da adoção de molas lineares e elásticas sob a viga, segundo a Teoria de Winkler. Os resultados obtidos corroboraram a teoria, que quanto maior a resistência do solo, menor a deformabilidade do solo, o que gera uma redistribuição das cargas nas molas ao longo da viga. Essa redistribuição das cargas pode trazer mudanças significativas nos esforços da viga, como por exemplo, os momentos fletores nas vigas 1 e 2 são bem maiores que nas vigas 7 e 8, isso por conta da viga 1 estar aérea, a viga 2 em solo pantanoso e as vigas 7 e 8 em solos de cascalho grosso, comprovando que quanto maior a resistência do solo, mais carga as molas absorvem.

Em relação ao uso do *software Ftool* para a análise e modelagem dos exemplos, se mostraram claros e objetivos, além de possuir um *layout* simples e de fácil manuseio. Por ser uma ferramenta gratuita, pode ser utilizado para fins acadêmicos e por profissionais da engenharia, pela facilidade na obtenção dos resultados.

REFERÊNCIAS

ABREU, J. F. A. C. **Estudo computacional via ansys de vigas, arcos e anéis com restrições de contato impostas por bases elásticas**. 2016. 84p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, 2016.

ANTONIAZZI, J. P. **Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais**. 2011. 139p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2011.

CHAMECKI, S. Consideração da rigidez no cálculo de recalques de fundações. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 1., 1956, p. 35-80, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Ipsis Gráfica e Editora, 1956.

CHRISTAN, P. **Estudo da interação solo-estaca sujeito a carregamento horizontal em ambientes submersos**. 2012. 194p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Curitiba, 2012.

COSTA, F. O. **Projetos estruturais de reservatórios paralelepípedicos de concreto armado moldados in loco**. 1998. 160p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo, 1998.

IWAMOTO, R. K. **Alguns aspectos dos efeitos da interação solo-estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda**. 2000. 140p. Dissertação

(Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo, 2000.

MACHADO, F. C. S. **Análise computacional via MDF de cascas cilíndricas com restrições bilaterais e unilaterais de contato.** 2013. 114p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, 2013.

MACIEL, F. V. **Equilíbrio e estabilidade de elementos estruturais com restrições bilaterais impostas por bases elásticas.** 2012. 107p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, 2012.

PEREIRA, W. L. **Formulações numéricas para análise de vigas em contato com bases elásticas.** 2003. 168p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, 2003.

SILVA, A. R. D. **Análise de placas com restrições de contato.** 1998. 146p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, 1998.

SOUZA, R. A.; REIS, J. H. C. Interação solo-estrutura para edifícios sobre fundações rasas. **Acta Sci. Technol.**, v. 30, n. 2, p. 161-171, 2008.

Data do recebimento: 20 de julho de 2019

Data da avaliação: 8 de novembro de 2019

Data de aceite: 11 de dezembro de 2019

1 Graduado em Engenharia Civil – UNIT. E-mail: vitoresplanada@hotmail.com

2 Graduado em Engenharia Civil – UNIT. E-mail: viniciuscorreia@gmail.com