

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/143

Análise comparativa da influência da consideração da interface solo-estrutura nas análises de tensão deformação para dimensionamento de estacas de contenção

Fernanda Sasdelli Figueiredo Sales
Engenheira Geotécnica, Fonntes Geotécnia, Belo Horizonte, Brasil,
fernanda.figueiredo@fonntesgeotecnica.com

Anderson Nascimento Milagres
Engenheiro Geotécnico, Fonntes Geotécnia, Belo Horizonte, Brasil,
anderson.nascimento@fonntesgeotecnica.com

Michel Moreira Morandini Fontes
Engenheiro Geotécnico, Fonntes Geotécnia, Belo Horizonte, Brasil, michel@fonntesgeotecnica.com

Gladys Hurtado Aquino
Engenheira Geotécnica, Fonntes Geotécnia, Belo Horizonte, Brasil, gladys.hurtado@fonntesgeotecnica.com

Fernando Oliveira de Queiroz
Engenheiro Geotécnico, Fonntes Geotécnia, Belo Horizonte, Brasil,
fernando.queiroz@fonntesgeotecnica.com

RESUMO: O dimensionamento de estacas metálicas utilizadas para contenção de solos e/ou rejeitos se dá pela avaliação realizada em software de análise 2D para verificação dos deslocamentos e momentos fletores máximos gerados nas estacas. A interface solo-estrutura aplicada na análise permite que o programa entenda que entre o solo e a estaca metálica haverá uma diferença de resistência e deformabilidade que poderão gerar deslizamento entre eles. Essa simulação é feita aplicando sobre os parâmetros de entrada do programa, como ângulo de atrito, módulo de deformabilidade normal e cisalhante do solo, um coeficiente de redução denominado Rinter. Esse coeficiente pode ser melhor determinado através de ensaios de cisalhamento direto, realizado com cada tipo de material presente na fundação e uma placa de metal semelhante ao aço da estaca, para que assim seja possível determinar com melhor precisão o ângulo de atrito no contato solo-estaca. Na ausência desses ensaios, o trabalho se baseou em valores de Rinter propostos em referências bibliográficas, onde para interação de estruturas metálicas com solos arenosos o valor de Rinter varia de 0,6 a 0,7. Por fim, o trabalho em questão, visa apresentar a variação dos deslocamentos e momento fletores nas análises de tensão deformação, com e sem a utilização do elemento de interface solo-estrutura, realizadas no dimensionamento de uma estrutura de contenção com estacas metálicas.

PALAVRAS-CHAVE: interface solo-estrutura, Rinter, estacas.

ABSTRACT: The sizing of metal piles used to contain soil and/or waste is carried out by evaluation carried out in 2D analysis software to verify the displacements and maximum bending moments generated in the piles. The soil-structure interface applied in the analysis allows the program to understand that between the soil and the metal pile there will be a difference in resistance and deformability that could generate slippage between them. This simulation is carried out by applying a Rinter reduction coefficient to the program's input parameters, such as friction angle, normal and shear deformability modulus of the soil. This coefficient can be better determined through direct shear tests, carried out with each type of material present in the foundation and a metal plate similar to the steel of the pile, so that it is possible to determine with better precision the angle of friction in the soil-pile contact. In the absence of these tests, the work was based on Rinter values proposed in bibliographic references, where for the interaction of metallic structures with sandy soils the Rinter value varies from 0.6 to 0.7. Finally, the work in question aims to present the variation in

displacements and bending moments in stress-strain analyses, with and without the use of the soil-structure interface element, carried out in the design of a containment structure with metal piles.

KEYWORDS: soil-structure interface, Rinter, piles.

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de uma estrutura de contenção com a utilização de estacas metálicas se dá por meio da verificação dos deslocamentos e momentos fletores máximos gerados na estrutura, comparado aos admissíveis. Essa verificação pode ser realizada a partir da simulação da situação mais crítica que a estrutura será submetida com auxílio de softwares de análise 2D que utiliza do método de elementos finitos para interpretação das análises de tensão-deformação.

No estudo conduzido por Meyerhof (1953, apud Mota, 2009), demonstra ser viável prever os recalques totais e diferenciais das fundações por meio de uma abordagem integrada do solo, infraestrutura e superestrutura. Para isso, tanto as propriedades do solo quanto a rigidez da estrutura devem ser levadas em consideração. Ainda, os recalques totais são menos influenciados pela rigidez da estrutura em comparação aos recalques diferenciais, que estão diretamente ligados ao tipo de rigidez da estrutura e às variações nas características do solo.

A interface solo-estrutura consiste na aplicação de um coeficiente de redução sobre o parâmetro de ângulo de atrito, módulo de deformabilidade normal e cisalhante do solo, denominado Rinter. Testes com modelagens numéricas mostram que quanto menor esse coeficiente Rinter, maior será o momento fletor e deslocamentos gerados na estrutura. Além disso, esse coeficiente de redução é diretamente influenciado pelos níveis de tensão, ou seja, quanto maior o nível de tensão maior será o Rinter, uma vez que, o confinamento em questão torna menos provável o deslizamento entre solo-estrutura. Portanto, é de suma importância que o valor estimado seja razoavelmente coerente para esta interface. O melhor método para se determinar esse coeficiente é utilizando-se de ensaios de cisalhamento direto, realizado com cada tipo de material presente na fundação e uma placa de metal semelhante ao aço da estaca, para que assim seja possível determinar com melhor precisão a relação entre o ângulo de atrito solo-estaca. Na ausência desses ensaios, existem estudos comumente utilizados que balizam o valor de Rinter, dessa forma, o trabalho se baseou em valores de Rinter propostos em referências bibliográficas, onde para interação de estruturas metálicas com solos arenosos o valor de Rinter varia de 0,6 a 0,7.

2 METODOLOGIA

2.1 Validação do Modelo Proposto

O estudo consiste na modelagem de uma estrutura de contenção, constituída por estacas tubulares metálicas. Para fins comparativos, foi analisado a influência no dimensionamento da estrutura, ao considerar a interface solo-estrutura, na modelagem das estacas nas análises de tensão-deformação.

Para o dimensionamento desse tipo de contenção, foram avaliados dois critérios. O primeiro, refere-se aos momentos fletores máximos gerados na estaca durante o carregamento gerado pelo meio a ser contido, devendo ser inferior ou igual ao momento máximo admitido pela estaca.

Salienta-se que o estudo em questão considera estacas cravadas pelo método *Press-In*, sendo assim, para o dimensionamento das estacas foram adotadas recomendações específicas do manual desenvolvido pela *International Press-in Association* (IPA) e apresentado por *CHINA ARCHITECTURE AND BUILDING PRESS* (2019). Embora no Brasil os estudos levam em consideração a determinação de Fatores de Segurança (FS) de referência para estudos de estabilidade, neste estudo, em razão do uso do método *Press-In*, optou-se por utilizar os critérios definidos no Japão que priorizam o estado limite de utilização conforme diretrizes da ASSOCIAÇÃO DE ESTRADAS DO JAPÃO (*Japan road association*, 2009). Logo, o deslocamento horizontal máximo é utilizado como critério desse estudo, sendo esse:

- Inferior a 3% da profundidade de escavação da contenção no caso de obras provisórias*.

*Essa diretriz da norma de estradas define os valores de deslocamento considerando que a estaca se encontra

totalmente enterrada. Portanto; para o caso em que se tem uma porção da estaca livre (acima da superfície do terreno), entende-se que sejam avaliados os deslocamentos em relação ao comprimento livre da estaca. Em termos de deformações, é condizente com *Japan Society of Civil Engineers*, 2009.

Em outras palavras, o deslocamento máximo relativo referido, é calculado considerando o deslocamento gerado no topo da estaca, subtraído do deslocamento no nível do terreno, sobre a altura livre da estaca, de forma que não supere 3%.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros da estaca utilizada na modelagem, obtidos a partir dos cálculos desenvolvidos para medir o momento resistente da área, havendo uma correção para o momento resistente por metro, para o estado plano, dividindo-o pelo diâmetro do tubo mais o espaçamento entre as estacas (0,20m).

Tabela 1. Parâmetros da estaca.

Estaca	Inércia corrigida m ⁴ (Estado Plano)	Área corrigida m ² (Estado plano)	Momento fletor admissível (kN*m)
1 Estaca de 1200mm, aço 50, espessura de 23mm	0,01004	0,05806	3848,62

2.2 Modelagem Numérica

A modelagem do presente estudo foi realizada no Phase2, da Rocscience, próprio para análises de tensão-deformação, onde torna possível a identificação dos momentos fletores e deslocamentos gerados em uma estaca quando submetida a uma carga de impacto. Este software trabalha com o método numérico de elementos finitos.

O Método dos Elementos Finitos é um método numérico que possui a premissa de obter uma solução contínua para forças e deslocamentos que se desenvolvem no meio, devido à compatibilização de deslocamentos em um nó compartilhado por dois elementos distintos. Todavia, há casos em que a descontinuidade deve ser reproduzida por um elemento numérico que a permita, como é o caso quando há a incorporação de um material com características muito distintas em um meio contínuo, estaca-solo.

Nesse tipo de situação, o meio que antes era contínuo, composto por materiais com características similares, sendo de resistência e rigidez, passa a apresentar descontinuidade na interface entre esse meio e o elemento incorporado. Nessa interface, devido a diferença entre as propriedades dos materiais, pode haver deslizamento entre os elementos.

Para a consideração desse deslizamento entre duas superfícies de materiais em um meio descontínuo pela presença de uma estrutura que os separa, como é o caso para os materiais de fundação e as estacas, é possível criar um elemento de “*structural interface*” na modelagem na plataforma de Método dos Elementos Finitos. Nesse tipo de elemento, é considerada uma interface imediatamente antes e imediatamente após o elemento estrutural avaliado para a contenção, permitindo assim deslocamentos diferenciais entre estaca e o solo de forma a possibilitar a consideração de ausência de vínculo entre elementos.

2.2.1 Interface solo-estrutura

Na consideração de uma interface de modelagem, deve-se fazer uso de um coeficiente de redução de resistência (R_{inter}) para subestimar a resistência e deformabilidade no contato do material. Isso permite uma avaliação de deslocamentos concentrados na interface, desconsiderando a típica condição de perfeita união entre nós na modelagem de Método dos Elementos Finitos.

Testes utilizando simulações numéricas demonstram que um menor valor da interface, denominado R_{inter} , está associado a um aumento no momento fletor e deslocamentos diferenciais. A determinação mais precisa possível do valor para esse coeficiente pode ser alcançada por meio de ensaios de cisalhamento direto, realizados com cada material presente na fundação e uma placa de metal similar ao aço da estaca. Embora existam valores indicativos na literatura devido à ausência desses ensaios, eles tendem a ser conservadores. Além disso, é importante salientar que esse coeficiente de redução é diretamente influenciado pelos níveis de

tensão. Ou seja, quanto maior o nível de tensão, maior será o valor de R_{inter} , uma vez que o confinamento resultante torna menos provável o deslizamento entre o solo e a estrutura.

Embora entenda-se que o coeficiente de redução utilizado pode ser mais bem determinado por meio de ensaios e interpretado a depender do nível de tensão em questão, optou-se, ainda assim, por utilizar valores de referência existentes na literatura. Ressalta-se que, essa consideração se deve a limitação e a ausência dos ensaios exigidos, contudo, a utilização desses valores torna a análise ainda mais conservadora. A Tabela 2 apresenta os valores de R_{inter} sugeridos por Brinkgrève e Shen (2011) a depender do tipo de interação solo-estrutura.

Tabela 2. Valores de referência para o coeficiente de redução R_{inter} (Brinkgrève e Shen 2011).

Tipo de interface	R_{inter}
Areia – Aço	0,6 – 0,7
Argila – Aço	0,5
Areia – Concreto	1,0 – 0,8
Argila – Concreto	1,0 – 0,8
Solo – Geogrelha	1,0

A equação para aplicação do coeficiente de redução sobre os parâmetros de resistência e deformabilidade do solo na interface solo-estrutura é descrita pelas equações abaixo:

$$\phi_R = \tan^{-1} (R_{inter} * \tan \phi') \quad (1)$$

$$E'R = R_{inter}^2 * E' \quad (2)$$

$$GR = R_{inter}^2 * G \quad (3)$$

Sendo,

ϕ_R : Ângulo de atrito reduzido;

$E'R$: Módulo de deformabilidade normal reduzido;

GR : Módulo de deformabilidade cisalhante reduzido;

ϕ' : Ângulo de atrito do solo;

E' : Módulo de deformabilidade normal;

G : Módulo de deformabilidade cisalhante.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros de entrada para modelagem no Phase2 da interface-solo estrutura.

Tabela 3. Parâmetros de entrada interface solo-estrutura.

Materiais	ϕ' (°)	ϕ_R (°)	E' (kPa)	$E'R$ (kPa)	G' (kPa)	$G'R$ (kPa)
Rejeito sob aterro	30,0	19,11	20.250,00	7.290,00	7.612,78	2.740,60
Rejeito sob aterro 2	27,0	17,00	11.250,00	4.050,00	4.229,32	1.522,55
Rejeito	23,0	14,29	2.250,00	810,00	845,86	304,51
Aterro	23,0	14,29	12.600,00	4.536,00	4.736,84	1.705,26
Aterro acesso	23,0	14,29	20.000,00	7.200,00	7.518,80	2.706,77
Solo residual maduro	28,0	17,69	10.500,00	3.780,00	3.947,37	1.421,05
Solo residual jovem S2	28,0	17,69	13.207,00	4.754,52	4.965,04	1.787,41
Solo residual jovem S3	28,2	17,83	23.100,00	8.316,00	8.684,21	3.126,32
Solo residual jovem Sapolito	31,5	20,19	51.750,00	18.630,00	19.454,90	7.003,76
Brita Graduada Simples – (BGS)	28,3	17,90	91.201,00	32.832,36	34.286,10	12.342,99
Brita Graduada Simples – (BGS)	39,0	25,91	20.000,00	7.200,00	7.518,80	2.706,77

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta o resultado da análise de tensão-deformação sem a consideração da interface solo-estrutura. Observa-se que, o momento fletor máximo foi de 1684,2 kNm sendo esse inferior ao admissível de 3848,62 kNm. Enquanto o deslocamento máximo relativo no trecho livre foi de 1,25% (inferior aos 3% limite) considerando que a estaca possui 4,0 m de altura livre.

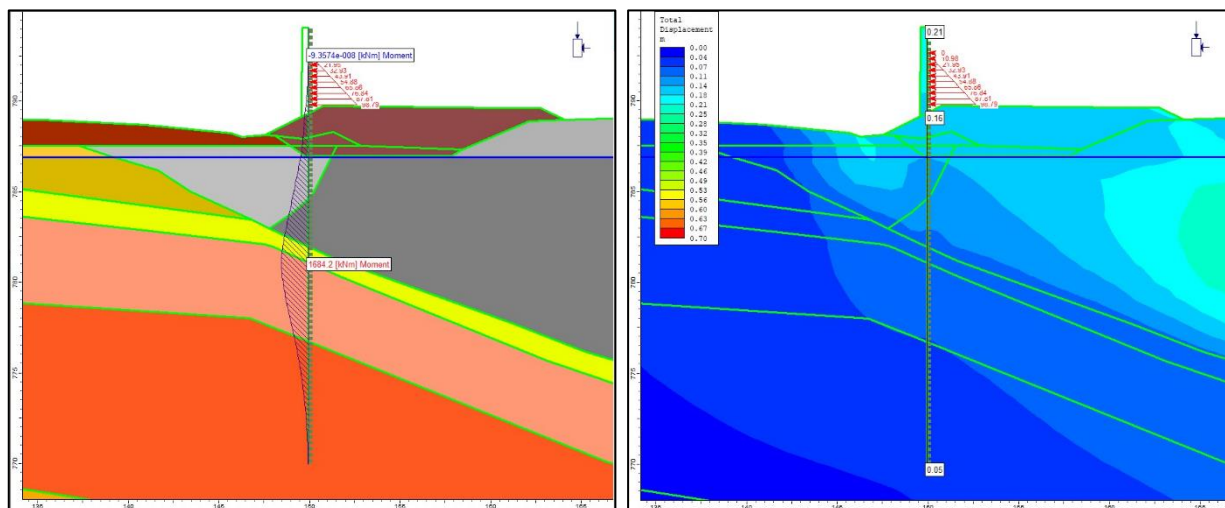


Figura 1. (a) momento fletor máximo; (b) deslocamentos totais máximos – sem interface solo-estrutura.

A Figura 2 apresenta o resultado da análise de tensão-deformação com a consideração da interface solo-estrutura. Observa-se que, o momento fletor máximo foi de 1822,0 kNm sendo esse inferior ao admissível de 3848,62 kNm. Enquanto o deslocamento máximo relativo no trecho livre foi de 1,50% (inferior aos 3% limite) considerando que a estaca possui 4,0 m de altura livre.

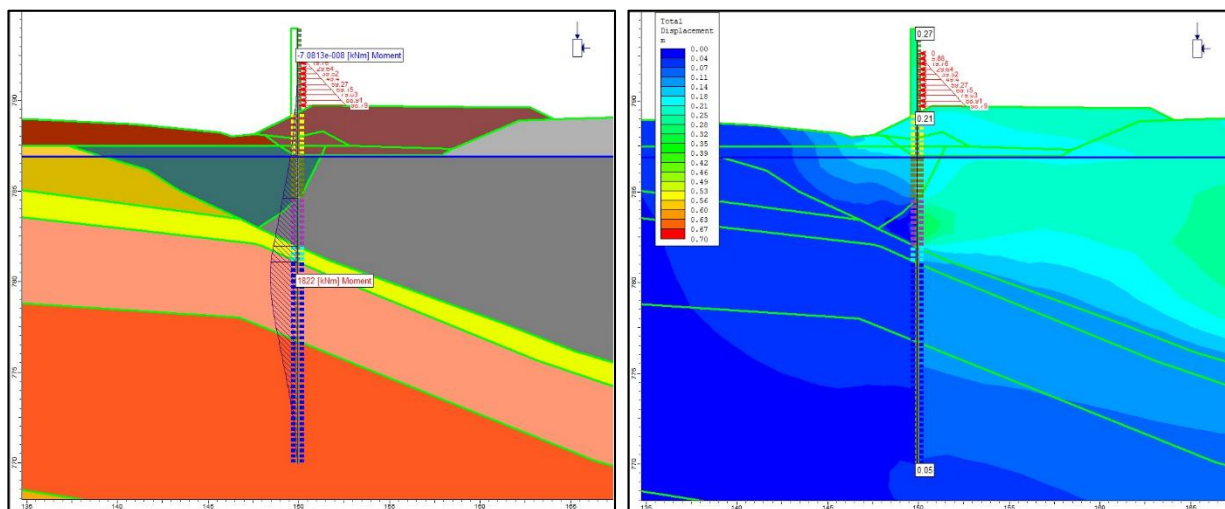


Figura 2. (a) momento fletor máximo; (b) deslocamentos totais máximos – com interface solo-estrutura.

Com base nos resultados obtidos, as análises de tensão-deformação aqui apresentadas mostram valores de momentos fletores máximos dentro do limite estipulado com uma folga considerável em ambas as simulações. Observa-se que o acréscimo no valor do momento fletor da análise sem interface para a com interface foi de aproximadamente 7,5%. Quanto aos deslocamentos, também se observa aumento, sendo de 0,25%.

Embora a consideração da interface solo-estrutura não tenha invalidado o dimensionamento, ela promove deslocamentos e momentos superiores. A interface gera na região de contato entre o solo e a estrutura

uma descontinuidade, sendo assim, uma zona de fragilidade no modelo, simulando um possível deslizamento entre os materiais em razão da diferença de propriedades. Dessa forma, é importante a sua consideração em modelagens do tipo, onde envolvem a incorporação de materiais com resistência e rigidez diferentes em meios contínuos, em busca de melhor representar os deslocamentos gerados.

Por fim, salienta-se que os resultados aqui se limitam às condições de contorno impostas no estudo, os acréscimos apresentados não necessariamente ocorrerão na mesma proporção em outros modelos.

4 CONCLUSÕES

A avaliação do dimensionamento das estacas metálicas utilizadas no modelo analisado, conforme descrito, mostra a importância da aplicação de modelos computacionais avançados e específicos. Esses modelos são essenciais para verificar os deslocamentos e momentos fletores máximos que podem ocorrer nas estacas, assegurando assim a estabilidade e a segurança da estrutura de contenção pretendida.

A incorporação da interface solo-estrutura nos modelos de análise é fundamental pois considera a interação complexa entre a estaca metálica e o solo circundante. Esta interação, que envolve diferenças de resistência e deformabilidade, pode resultar em deslizamento entre o solo e a estaca, impactando diretamente a performance da estrutura. A utilização do coeficiente de redução, R_{inter} , baseado em ensaios de cisalhamento direto, permite uma estimativa mais precisa das condições de atrito entre o solo e a estaca metálica. Dessa forma, é evidente a importância de conduzir ensaios de cisalhamento direto que considerem as características únicas de cada material presente na fundação e a interação com a estaca metálica.

Por fim, o trabalho demonstra que a adoção ou não da interface solo-estrutura nos modelos de análise tem um impacto significativo nos resultados de deslocamento e momentos fletores. Isso ressalta a necessidade de uma abordagem rigorosa no dimensionamento de estruturas com estacas metálicas, garantindo que todos os fatores relevantes sejam considerados. Assim, conclui-se que a modelagem combinada com ensaios específicos que permitem ajustes de parâmetros como o R_{inter} , é vital para o projeto eficiente e seguro de contenções com estacas metálicas em diferentes condições de solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brinkgreve, M.; SHEN, R. F. (2011) Structural Elements & Modelling Excavations in Plaxis. Delf, the Netherlands.
- International press-in association. Press-in retaining structures: a handbook. 2. Ed. Atual. [s. L.]: china architecture and building press, 2019. 392 p.
- International press-in association: a handbook for steel tubular pile retaining wall by gyropress method (gyropress method), march 2014 (in japanese).
- Japan road association (associação de estradas do japão (2009). Norma técnica, isbn-10: 488950415x, 01 de julho de 2009. 道路土工一切土工・斜面安定工指針 (diretrizes para o trabalho de terraplenagem de estradas e estabilização de taludes), [s. L.].
- Japan society of civil engineers. (2009) Standard Specifications for Steel and Composite Structures. 1. ed. [S. l.: s. n.].
- Mota, M.M.C. (2009). Interação solo-estrutura em edifícios com fundação profunda: método numérico e resultados observados no campo. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.