Comparativo de blocos de fundação sobre estacas para reservatório metálico vertical com variação de rigidez e considerando a interação solo-estrutura

Comparative of caps piles for a vertical metallic tank with rigidity variation and considering the soil-structure interaction

DOI:10.34117/bjdv7n2-270

Recebimento dos originais: 10/01/2020
Aceitação para publicação: 13/02/2021

José Roberto Rasi
Mestre em Estruturas e Construção Civil pela UFSCAR
Instituição: Tamoyo Tupã Ind. e Com. de Artefatos de Cimento Ltda.
Endereço: Rod. Comandante João Ribeiro de Barros – Km. 528, Tupã – SP,
E-mail: jroberto.rasi@gmail.com

Jorge Augusto Serafim
Mestre em Estruturas e Construção Civil pela UFSCAR
Instituição: Solver Engenharia, Projetos e Consultoria Ltda
Endereço: R. Antônio Costa, 685 - Vista Alegre, Curitiba – PR
E-mail: jaserafim@solver.eng.br

Wellington Mazer
Doutor em Ciência pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA
Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Endereço: Av. Sete de Setembro, 3.165 - 80230-901 - Curitiba PR.
E-mail: mazer.utfpr@gmail.com

Donizete Caunetto
Especialista em Engenharia de Estruturas
Instituição: Suportte Engenharia Ltda
Endereço: Rua Chavantes, 394, Tupã – SP,
E-mail: donizete@suportteengenharia.com.br

Jonathan Figueiredo Broetto
Engenheiro Civil pela UNIMAR – Universidade de Marilia
Instituição: Dipawa Ltda
Endereço: Rod. Comandante João Ribeiro de Barros – Trevo principal s/n, Tupã – SP,
E-mail: engenharia@dipawa.com.br

RESUMO
Blocos de fundação para suporte de reservatório metálico vertical não são muito estudados no meio acadêmico e são elementos estruturais que possuem grande importância pois suportam grandes carregamentos devido ao elevado volume de água armazenada nesses reservatórios. Este artigo analisou a influência da rigidez dos blocos nas variações dos carregamentos das estacas, em função da variação da altura, para um mesmo carregamento e mesmo número de estacas. A análise numérica foi realizada por meio do Método de Elementos Finitos do programa computacional SAP2000 e foram analisados blocos sobre vinte e duas estacas escavadas mecanicamente estacas com

alturas de 50, 75, 100 e 125 cm. Os resultados mostraram que quanto maior a rigidez do bloco, menor foram as diferenças de carregamento nas estacas.

Palavras-Chave: Blocos de estacas, Analise estrutural, Base de reservatórios.

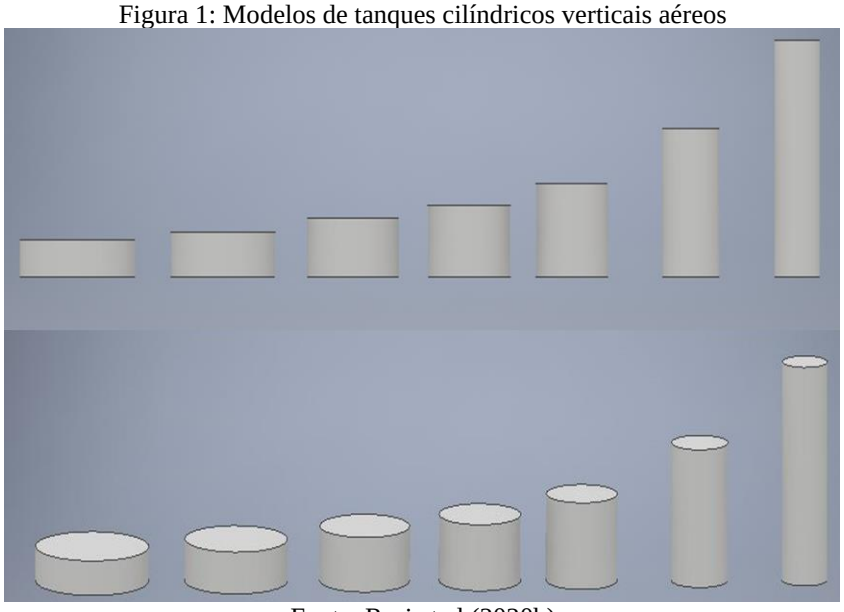
ABSTRAT
Piles cap to support vertical metallic tank are not widely studied in academia and are structural elements that are of great importance because they support large loads due to the volume of water stored in these tanks. This article analyzed the influence of the blocks' rigidity on the variations in the loadings of the piles, as a function of the height variation, for the same load and the same number of piles. The numerical analysis has performed using the Finite Element Method of the SAP2000 computer program, and blocks have analyzed on twenty-two piles of mechanically excavated piles with heights of 50, 75, 100, and 125 cm. The results showed that the greater the block stiffness, the smaller the loading differences in the piles.

Keywords: Piles cap, Structural analysis, Metallic tank base,

1 INTRODUÇÃO

Na última década, impulsionado pelos incentivos governamentais através do programa habitacional do Ministério das Cidades, denominado Programa Minha Casa Minha Vida, provocou a implantação de novos loteamentos e condomínios horizontais, ocasionando uma grande demanda de tanques de armazenamento de água potável, na sua grande maioria do tipo aéreos, cilíndricos e com diâmetro e alturas variáveis, denominados de *"castelo d'água"* (RASI *et al*, 2020a), conforme mostra a Figura 1.

Figura 1: Modelos de tanques cilíndricos verticais aéreos



Fonte: Rasi et al (2020b)

A escolha por reservatórios elevados é justificada pelas características da região onde o mesmo será implantado e da necessidade de se obter maior energia hidráulica para a distribuição do líquido armazenado, sendo que este tipo de reservatório apresenta grande viabilidade. Eles devem estar apoiados em estruturas especificas de sustentação denominados de bases ou embasamentos (SILVA, 2017).

O projeto do reservatório metálico é elaborado admitindo-se hipótese de apoios indeslocáveis, ou seja, uma base infinitamente rígida, permanecendo assim após a aplicação dos carregamentos. Nesta hipótese, os recalques de fundação são desprezados, considerando assim, que esse efeito não provocará alterações nos carregamentos da estrutura (SOUZA, 2019).

Já para o dimensionamento da fundação, consideram-se somente as cargas na mesma e as propriedades geotécnicas do solo, certificando que os deslocamentos verticais estejam compatíveis com os níveis admissíveis, assumindo que cada elemento da fundação está isolado e pode deslocar-se independente dos demais (GUSMÃO, 1990).

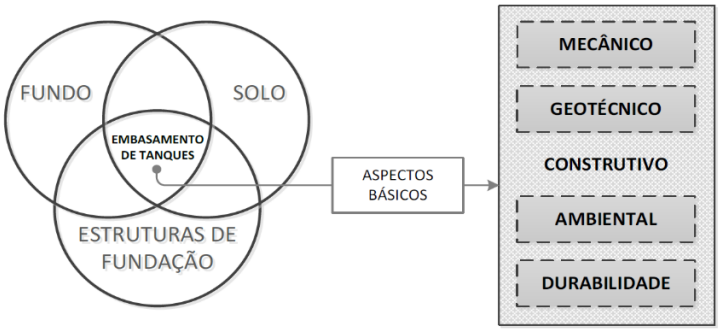
Devido ao recalque ser um fenômeno comum em todas as estruturas apoiadas no solo e ocorre em razão do rearranjo da estrutura do solo provocado pelo carregamento exercido no maciço. (FRIAS *et al*, 2020) afirmam ainda que ao decorrer do tempo, essas deformações podem ficar fora dos padrões definido em projeto, podendo surgir manifestações patológicas, desde um desconforto visual até danos severos que colocam em risco a integridade da estrutura. Alves (2013) afirma que o correto funcionamento de um embasamento de tanques de armazenamento é governado pela interdependência de três elementos fundamentais: o solo, a estrutura de fundação e fundo do tanque. O dimensionamento apropriado passa pelo estudo do comportamento global desses elementos diante dos agentes e cenários aos quais estão expostos. Descreve então, Alves (2013) que o projeto de embasamento de tanques é composto por cinco aspectos básicos:

- Aspecto Mecânico, envolvendo a concepção estrutural do fundo e a sua concepção hidráulica;
- Aspecto Geotécnico, abordando o subleito, características geotécnicas do solo e os elementos de fundação;
- Aspectos Ambientais, envolvendo os sistemas projetados para proteção do meio ambiente em caso de falhas e vazamentos, como contenções e detecção de vazamentos;

- Aspecto de Durabilidade, contempla os sistemas de proteção que salvaguardarão o fundo do tanque de ataques físicos químicos, e
- Aspectos Construtivos, aspecto fundamental tratando-se da materialização de todos os demais aspectos. Comtempla as etapas construtivas do tanque.

A Figura 1 mostra a interdependência dos elementos fundamentais de embasamento de tanques de armazenamento, conforme descrito.

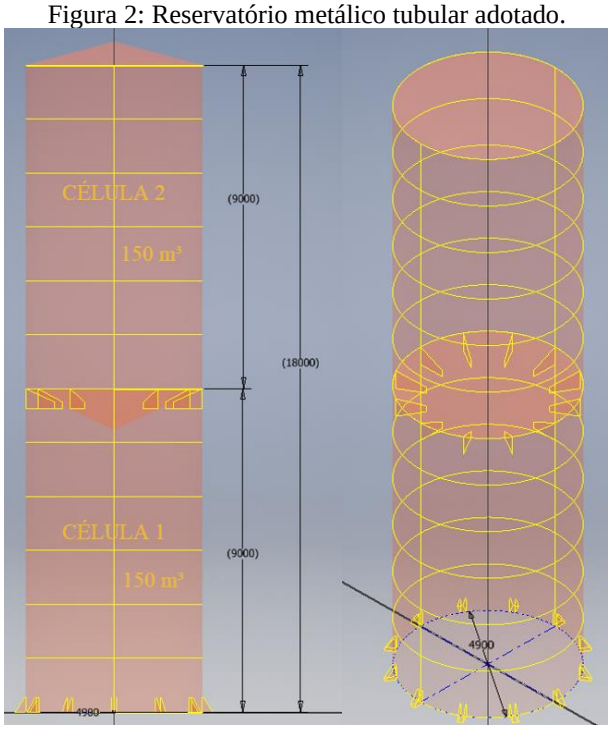
Figura 1: Elementos fundamentais de embasamento de tanques de armazenamento



Fonte: Alves (2013)

Para fins de carregamento dos blocos, foi adotado um reservatório metálico tubular (Figura 2), com diâmetro nominal 4,90 m, altura total de 18,00 m, com duas células de armazenamento de água com capacidade de 150,00 m³ cada, com o total de 300,00 m³ (2.946,00 kN). O peso próprio do reservatório é de 15,40 tf (151,02 kN).

Figura 2: Reservatório metálico tubular adotado.



Fonte: Os autores.

Esse trabalho tem como objetivo avaliar, mediante análise numérica, por meio do Método de Elementos Finitos considerando-se a interação solo-estrutura, os efeitos da variação da rigidez do bloco de fundação do tanque metálico com ajuste da sua altura, nos carregamentos das estacas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um dos parâmetros determinantes na definição do tipo de fundação a ser adotada em determinado empreendimento é a capacidade resistente do solo. Quando os estudos geotécnicos indicam baixas resistências em cotas próximas à superfície, o emprego de fundações profundas torna-se a solução mais viável, sendo recorrente o uso de estacas pré-moldadas, metálicas ou concretadas in situ (NUNES 2020).

A ABNT NBR 6122:2019 define fundação profunda como elemento de fundação que transmite a carga ao terreno ou pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, sendo sua ponta ou base apoiada em uma profundidade superior a oito vezes a sua menor dimensão em planta e no mínimo 3,0 m; quando não for atingido o limite de oito vezes. Neste tipo de fundação, incluem-se as estacas e tubulões.

A utilização da fundação profunda exige a construção de um elemento estrutural denominado bloco de coroamento ou bloco sobre estacas (SOUSA, 2019).

A ABNT NBR 6118:2014 define blocos como estruturas de volume usadas para transmitir às estacas e aos tubulões as cargas de fundação, podendo ser considerados rígidos ou flexíveis por critério análogo ao definido para sapatas.

O uso de bases tipo bloco sobre estacas para apoiar diferentes tipos de estruturas aumentou significativamente nas últimas três décadas e é reconhecido como o tipo de fundação mais econômica aplicável a qualquer tipologia de superestrutura. Além disso, a fundação de bloco sobre estacas tem atributos para atender os mais importantes requisitos de layout comparados com os outros tipos de fundações (MAGABE e INGLE, 2020).

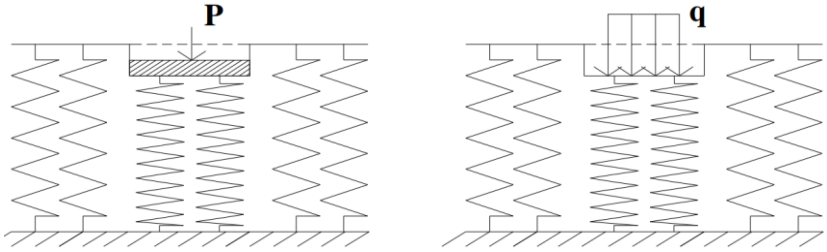
Nos modelos estruturais atuais, todos os esforços produzidos pela superestrutura são conduzidos ao solo, provocando deformações e acarretando deslocamentos (recalques) na estrutura. Esses deslocamentos geram novos esforços na estrutura, sendo um processo iterativo, estabilizando após convergências dos esforços e deslocamentos. Esse processo interativo entre o solo, a fundação e a superestrutura são denominadas interação solo-estrutura (ISE), sendo um dos fatores que controla a performance dos sistemas estruturais (MOTA, 2009). O processo de interação solo-estrutura inicia-se na

fase de construção e continua até que se atinja um estado de equilíbrio, em que as tensões e as deformações estão estabilizadas, tanto da estrutura como do maciço de solos (COLARES, 2006).

O objeto de estudo da interação solo-estrutura é a ação recíproca entre os corpos materiais (ou elementos) componentes do conjunto tridimensional formado pelo sistema estrutural (estrutura) e pelo sistema geotécnico (maciço de solos diversos) de uma obra de construção civil submetida às diversas ações externas. O equilíbrio estático desse sistema tridimensional altamente hiperestático envolve a interação entre elementos contínuos do maciço de solos e elementos discretos da estrutura (AOKI e CINTRA, 2005). Em uma análise estrutural que considere o comportamento do solo na superestrutura, denominada análise de interação solo-estrutura (ISE), geralmente obtêm-se recalques mais uniformes e cargas nos pilares diferentes daqueles obtidos pelo projetista de estruturas, que adotou hipótese de apoios indeformáveis (VELLOSO e LOPES, 2009).

Já Porto e Silva (2010) afirmam que uma análise estrutural, considerando-se a interação solo-estrutura, não necessariamente irá promover uma estrutura mais econômica e sim uma estrutura mais realista, pois se avaliará a distribuição de tensões considerando-se a deformabilidade do maciço de solos. Ressaltam ainda que uma modelagem numérica “realista” não depende apenas do engenheiro de estruturas, mas também do engenheiro geotécnico, para, assim, se ter parâmetros dos solos, de fato, reais, a serem usados na modelagem. Esses parâmetros podem ser quantificados por meio de ensaios de campos ou de laboratório, ou mesmo por tabelas de correlações. Através destes dados torna-se possível a simulação da interação solo-estrutura nos modelos estruturais, empregando molas (Figura 3), que representam a deformabilidade do solo, ou impondo os deslocamentos, simulando os efeitos dos recalques. É o modelo que representa as propriedades mecânicas do solo por meio de molas elásticas no contorno estrutura-solo, conhecido como Hipótese de Winkler (ANTONIAZZI, 2011).

Figura 3: Sistema de molas discretas para carregamentos rígidos (**P**) e uniformemente distribuído (**q**)



Fonte: Colares (2006)

Antoniazzi (2011) afirma que essa simplificação tem como base a Hipótese de Winkler, formulada pelo mesmo em 1867, onde a deformação da fundação devido à carga aplicada está confinada apenas nas regiões carregadas e não considera a presença de molas adjacentes e é feita apenas para obtenção da constante elástica (K_V) a ser adicionada nos apoios dos modelos estruturais na ferramenta de análise SAP 2000.

De acordo com Rasi et al (2020c), a obtenção dos recalques das estacas foi feita através da ferramenta computacional Site Engenharia, modulo Recalque de Estacas pelo método Aoki e Cintra (2010). É estabelecida, então, uma relação pontual entre a fundação e o solo, através de constante de mola (K_V), a qual representa a rigidez do solo. Essa constante pode ser obtida através da relação matemática (Expressão 1).

$$K_V = \frac{F}{\rho} \qquad (1)$$

Onde:

F – Carga atuante na fundação (kN);

r – O deslocamento / recalque da estaca (m),

K_V – A constante de mola (coeficiente de reação vertical – kN/m).

O coeficiente de reação vertical K_V não constitui uma propriedade do solo, mas está atrelado também a diversos fatores como a forma e dimensões da fundação, o tipo de construção e flutuações de carregamento.

De acordo com Aoki e Cintra (2010) o recalque de uma estaca (**r)** pode ser dividido em dois componentes distintos:

- Encurtamento elástico, definido por um recalque de igual magnitude na cabeça da estaca, mantida imóvel a sua base ($\mathbf{r_e}$);
- Recalque do solo, caracterizado por deformações verticais de compressão de estratos de solos subjacentes à base da estaca, até o indeslocável, que resulta um recalque da base ($\mathbf{r_S}$).

O deslocamento / recalque total da estaca (**r)** é dada pela soma do encurtamento elástico da estaca (**r_e**) e do recalque do solo (**r_S**).

Segundo Colares (2006), a intensidade dos efeitos da interação solo-estrutura depende de alguns aspectos diretos e indiretos relacionados com a fundação e a estrutura, sendo o mais importante, dentre outros, é a rigidez relativa solo-estrutura.

De acordo com Mendonça (2012), o acréscimo de rigidez da fundação resulta em uniformização dos recalques, sendo que sob esse ponto de vista, é interessante que os elementos da fundação sejam combinados e enrijecidos. Reafirma ainda que os valores dos recalques máximos absolutos e diferenciais diminuem à medida que se aumenta a rigidez relativa da estrutura.

Gusmão e Lopes (1991), através de análise do comportamento de um pórtico modelado como edifício de concreto armado apoiado sobre meio elástico, analisaram a ordem de grandeza dos recalques e propuseram o parâmetro de rigidez relativa estrutura-solo (K_{SS}), para determinar a variação de grandeza dos recalques Expressão 2).

$$K_{ss} = \frac{E_c \cdot I_b}{E_s \cdot l^4} \qquad (2)$$

E_c – Modulo de elasticidade do material da estrutura

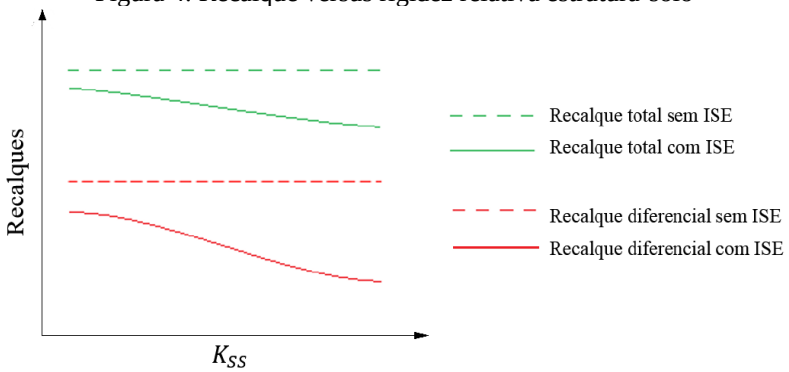
E_s – Modulo de elasticidade do solo

I_b – Momento de inercia da viga típica

L – Comprimento do vão entre pilares

Esse comportamento é mostrado na Figura 4, onde o aumento da rigidez K_{SS} no sistema estrutura-solo reduz os valores de recalques absolutos e diferencial máximo.

Figura 4: Recalque versus rigidez relativa estrutura-solo



Fonte: Gusmão e Lopes, 1991.

De acordo com Alves e Tomaz (2018), a classificação dos blocos de estacas em rígido ou flexíveis está diretamente ligado à altura do bloco e à distância do centro da

estaca mais afastada até a face do pilar, ou seja, está diretamente ligada à inclinação das bielas. De acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014, quando se verifica a Expressão 3, nas duas direções, o bloco é considerado rígido.

$$h \geq \left(\frac{a - a_p}{3}\right) \qquad (3)$$

onde:

h – Altura do bloco;

a – Dimensão do bloco em uma determinada direção, e

a_p – Dimensão do pilar na mesma direção.

A norma ABNT NBR 6118:2014 define ainda que o comportamento estrutural do bloco rígido se caracteriza por trabalhar nas duas direções, mas com trações concentradas nas faixas das estacas. Esta norma também recomenda que o espaçamento mínimo entre as estacas esteja dentro de um intervalo de 2,5 a 3,0 do diâmetro destas e que as barras de armaduras principais sejam distribuídas em faixa de largura de 1,2 vezes o diâmetro das estacas (AZEVEDO, 2018).

Os recalques normalmente dependem das tensões aplicadas, das condições de umidade e das propriedades geotécnicas de cada tipo de solos. Esses recalques são classificados como normais e tendem a se estabilizar ou cessar após período de tempo. Mas, de acordo com Cintra (1998), existe um recalque que é chamado de colapso e esse solo é classificado como colapsível. GUTIERREZ *et al* (2004), afirma que esse tipo de solo, normalmente solo não saturado, pode causar uma espécie de colapso em sua estrutura, caracterizado por um recalque suplementar, repentino e de grandes proporções.

O solo colapsível possui uma rigidez temporária mantida pela tensão de sucção e / ou cimentação, mas apresenta uma estrutura instável diante do aumento do teor de umidade e quando esse limite crítico é ultrapassado ocorre o colapso (LESSA, 2005).

No Brasil, existem vários solos colapsíveis que foram encontrados e investigados nos estados: Amazonas, Bahia, Ceará, Distrito Federal, Goiás, Minas Gerais, Paraná, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Sul, São Paulo e no Tocantins (MEDERO, 2005).

Para o correto dimensionamento de fundação com estacas em solos colapsíveis, Rasi et al (2019) recomenda em majorar o carregamento com fator de segurança adicional, que resultaria em maiores comprimentos de estacas, embutindo parte significante do fuste em estrato não colapsível.

3 METODOLOGIA

A metodologia tem por base o processo descrito por Aoki e Cintra (2004), que adaptaram o uso de molas no modelo proposto inicialmente por Chamecki (1954).

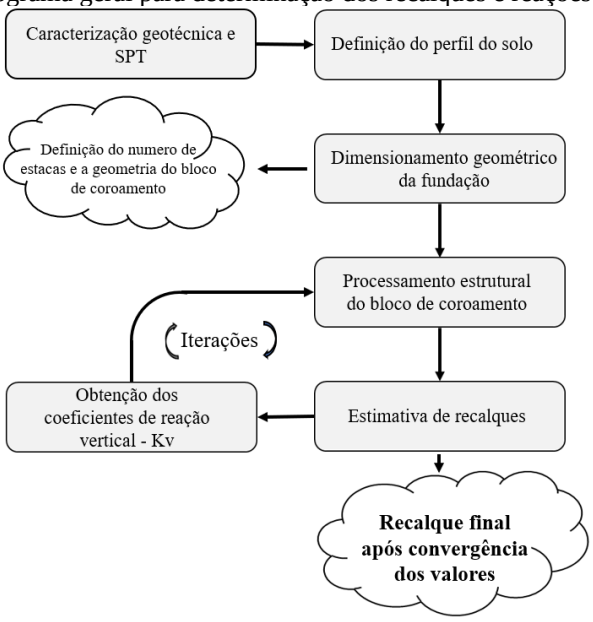
As fundações analisadas foram três tipos de blocos sobre vinte e duas estacas, para sustentar um reservatório metálico tipo tubular aéreo de capacidade de reservação de 300,00 m³, onde os as reações de apoio foram obtidas pelo *software* SAP2000 V20 e a estimativa de recalque foram obtidas pelo *software* SITE ENGENHARIA, modulo Recalque de Estacas utilizando-se o Método de Aoki-Lopes (2004).

Para determinar a redistribuição das reações de apoio, a interação solo-estrutura se deu por meio de cálculo iterativo. Inicialmente, admitiu-se a hipótese de apoios indeslocáveis para a obtenção das reações de apoio iniciais em cada estaca (Fz). Em seguida, foram obtidos os recalques das estacas (**r)**, utilizando o Método de Aoki-Lopes (2004), com os quais se determinaram os coeficientes de mola (K_v) e estes substituíram os apoios indeslocáveis no modelo estrutural (Bloco de coroamento) para uma segunda iteração. Após esta etapa, a estrutura foi recalculada com apoios elásticos e novas reações de apoio e novos recalques foram obtidos. O processo se repetiu até a convergência desejada.

O recalque obtido na última iteração, onde os valores convergiram, foi considerado o recalque final resultante da consideração dos efeitos da análise de interação solo- estrutura.

A Figura 5 mostra o fluxograma geral para determinação dos recalques e reações de apoio utilizando o ISE.

Figura 5: Fluxograma geral para determinação dos recalques e reações utilizando ISE



Fonte: Os autores.

Para o dimensionamento dos três blocos de coroamento utilizando estacas tipo escavada mecanicamente e as seguintes propriedades dos materiais, conforme estabelecido pela ABNT NBR 6118:2014. A resistência característica à compressão utilizada para a modelagem foi o de 30 Mpa; as barras de aço para a armadura foi o CA 50, com modulo de elasticidade igual a 210.000 Mpa, o coeficiente de Poisson igual a 0,3 e a resistência característica ao escoamento de 500 Mpa. O cobrimento da ferragem foi de 5,0 cm.

Foi adotado o solo tipo deformável (argila siltosa e argila arenosa) conforme a sondagem mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Sondagem solo sob a base

PROFUNDIDADE Classificação	(m)	SPT (Nº golpes)	N. A. após 24h (m)	ESTACA (m)
	1,00	2		
	2,00	3		
	3,00	2		
	4,00	5		
Argila siltosa	5,00	8		
	6,00	11		
	7,00	13		
	8,00	20		
	9,00	23		
	10,00	27		
	11,00	29		
	12,00	29	13,05	11,00
Argila arenosa	13,00	30		
	14,00	35		
	15,00	40		

Fonte: Os autores.

Segundo Ramos e Gionco (2009), o solo indeformável é um solo que representa o comportamento de estacas sendo apoiado em rocha, ou seja, não há deslocamento axial com a aplicação de força na estaca, sendo assim adotado restrição total dos deslocamentos na direção do eixo Z (Indeslocável).

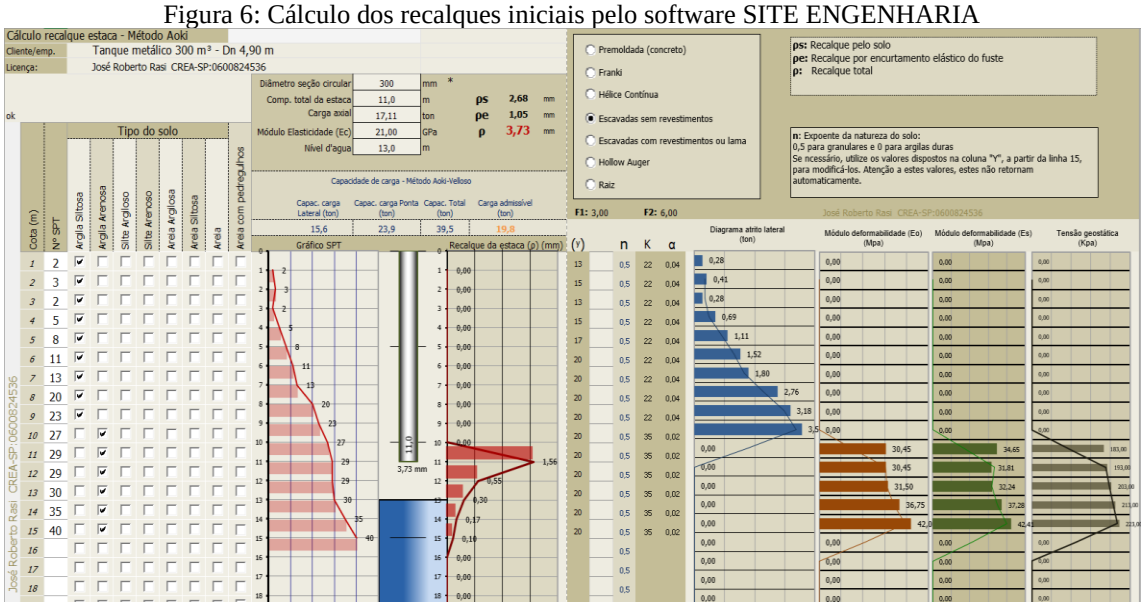
As reações das estacas dos blocos, com apoios indeslocáveis, foram também calculados através do método de Schiel (1957), para análise comparativa. Esse método tem as seguintes premissas: O bloco de estacas é considerado infinitamente rígido; O material da estaca é considerado elástico e linear; A reação em cada estaca é proporcional à projeção do deslocamento do topo da estaca sobre o eixo da mesma, antes do deslocamento.

Para blocos com estaqueamento simétrico com todas as estacas iguais, as reações nas estacas são obtidas por meio da Expressão 4.

$$R_{k,i} = \frac{N_k}{n} \pm \frac{M_y \cdot x_i}{\sum x_i^2} \pm \frac{M_x \cdot y_i}{\sum y_i^2} \qquad (4)$$

Para as modelagens do solo deformável foi utilizado, no SAP 2000, as restrições tipo *Springs* na direção do eixo Z, com valores de K_V (kN/m), obtido com o do recalque total da estaca (**r**), encurtamento elástico da estaca ($\mathbf{r_e}$) e do recalque do solo (**rs**), através do *software* SITE ENGENHARIA (Figura 6) e aplicação da Equação 1.

Figura 6: Cálculo dos recalques iniciais pelo software SITE ENGENHARIA



Fonte: Os autores.

A aplicação da força no bloco pelo reservatório metálico foi na forma de incrementos (adotado incrementos de 10%), em virtude da consideração da não-linearidade física.

Os blocos propostos para a análise numérica possuem vinte e duas (22) estacas dispostas em dois círculos concêntricos e uma estaca cravada no centro da base.

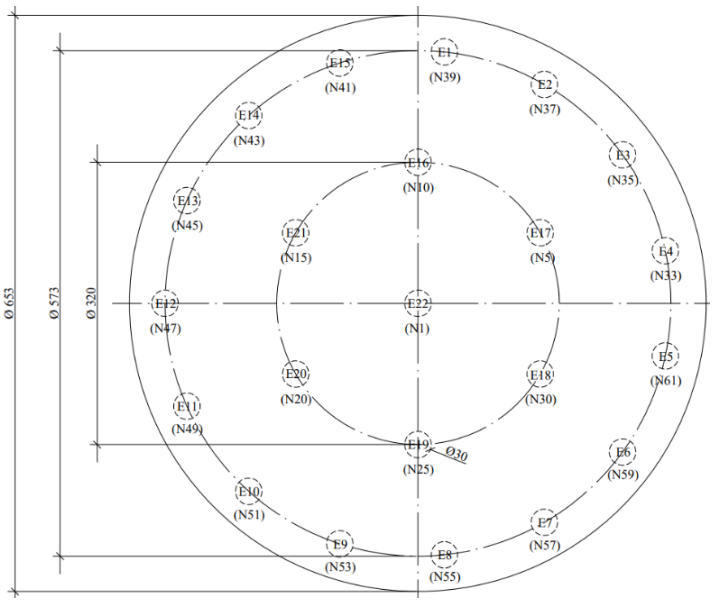
De acordo com Azevedo (2018), as recomendações de espaçamento do eixo da estaca até a extremidade do bloco são importantes, pois visam dispor o tamanho necessário para ancorar as barras das armaduras principais de tração e proporcionar adequado cobrimento. Montoya (2000) recomenda que o espaçamento mínimo entre o perímetro da estaca até a extremidade do bloco não pode ser menor que o raio da estaca e também inferior a 25,0cm.

Os blocos analisados possuem as mesmas dimensões geométricas em planta, variando-se apenas as alturas. As dimensões em planta são iguais a 6,53 m de diâmetro externo.

O diâmetro das estacas hélice continua é 30 cm e a dimensões do reservatório metálico vertical é 4,90 m de diâmetro e 18,00 m de altura total. O espaçamento do eixo das estacas do anel externo (Ø573 cm) até a face do bloco foi de 40 cm. Na Figura 7 é representado com detalhes as dimensões do bloco, a numeração das estacas (dentro do ebloco) e a numeração dos nós (Elementos Finitos – em parênteses). Todas as estacas foram referenciadas por essas numerações.

Uma vez que o tanque metálico está totalmente fixado ao bloco por chumbadores, e que o fundo do mesmo transmite à base o carregamento vertical de água, consideramos como pilar sobre a base e verificamos, através da Expressão 3, da ABNT NBR 6118:2014, a altura do bloco, para classificação como bloco rígido. Temos a largura do bloco a = 653 cm e largura do tanque a_p = 490 cm, temos $h \geq 54{,}34$ cm. Para altura do bloco superior a 54,34 cm, podemos considerar o bloco rígido.

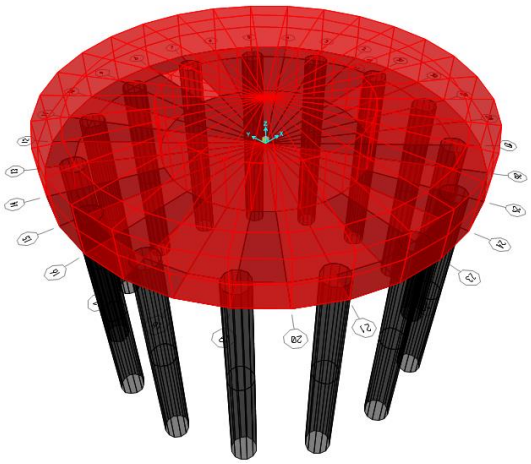
Figura 7 – Dimensões do bloco (cm).



Fonte: Os autores.

Na Figura 8 a seguir, é mostrado a modelação numérica tridimensional (3D) analisado, retirado do programa SAP 2000.

Figura 8 – Propriedades geométricas do bloco sobre estacas.



Fonte: Os autores.

Na análise numérica, através do Método dos Elementos Finitos do software SAP 2000, foram simulados blocos com diferentes tipos de rigidez, provocadas pela variação da altura. Foram adotadas as seguintes alturas dos blocos de fundação: 50 cm, 75 cm, 100 cm e 125 cm. Foi adotado apenas um caso de ações aplicado ao bloco, e apenas a ação das forças verticais foi considerada. A força de compressão aplicada no bloco através do tanque metálico foi de 3.093,13 kN. Não foram considerados as forças horizontais resultantes da aplicação de vento no tanque metálico.

4 RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir do perfil de sondagem, altura do bloco e o carregamento nominal no bloco de vinte e duas estacas, foi determinada, com a utilização do *software* Site Engenharia, o recalque do solo junto à estaca (**r**s) e o encurtamento elástico da estaca ($\mathbf{r}_E$), devido o carregamento total (Ptotal = Água, Tanque e Bloco de estacas) que resulta no carregamento nas estacas (Qestaca) obtido através do método de Schiel (Expressão 4). Os valores da reação vertical (K_V), foram calculados utilizando a Expressão 1.

As Figuras 6, 7, 8 e 9 mostram as reações de apoios devido às estacas, com setas mostrando os sentidos e com os valores em kN.

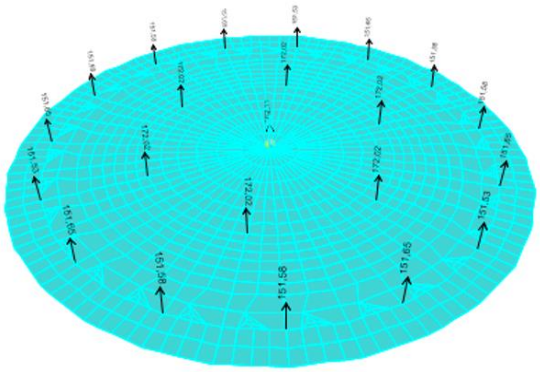
A Tabela 3 apresenta os valores da reação vertical (K_V) utilizados como restrição tipo *Springs* na direção do eixo Z, no software SAP 2000, na primeira iteração.

Tabela 3 – Cálculo de Kv em função da altura da base

	Kv das estacas (kN/m) Altura da base (cm)				
	50	75	100	125	
Ptotal	3.488,19	3.692,59	3.896,98	4.101,37	kN
Qestaca	158,55	167,85	177,14	186,43	kN
Qestaca	16,17	17,11	18,06	19,01	tf
ρ_S	1,99	2,68	3,34	3,97	mm
ρ_E	1,05	1,05	1,05	1,05	mm
ρ	3,04	3,73	4,39	5,02	mm
Kv	**52.162,35**	**44.984,39**	**40.343,53**	**37.136,34**	kN/m

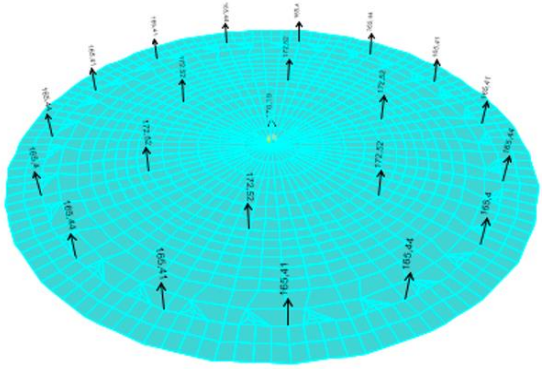
Fonte: Os autores.

Figura 6 – Reações das estacas - bloco h = 50 cm



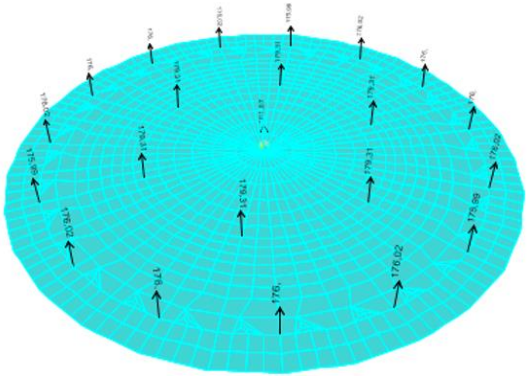
Fonte: Os autores.

Figura 7 – Reações das estacas - bloco h = 75 cm



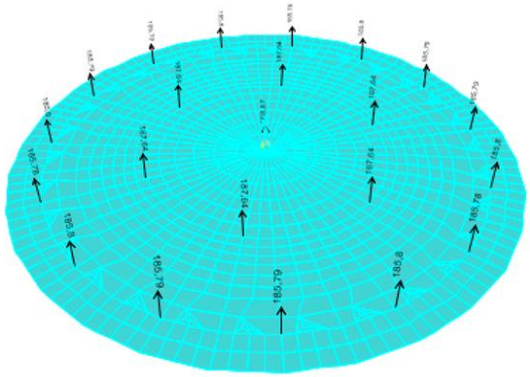
Fonte: Os autores.

Figura 8 – Reações das estacas - bloco h = 100 cm.



Fonte: Os autores.

Figura 9 – Reações das estacas do bloco h - 125 cm



Fonte: Os autores.

Na Tabela 4 são apresentadas as reações nas estacas para os quatros de blocos com as alturas de 50 cm, 75 cm, 100 cm e 125 cm. A comparação utilizada nesta tabela é feita em termos da relação (M.E.F./ANLT) entre a reação nas estacas obtidas no modelo numérico (M.E.F.) analisado pelo software SAP 2000 e a reação das estacas do modelo analítico (ANLT), obtidas através do método de Schiel, dado pela Expressão 4.

Tabela 4 – Reações nas estacas

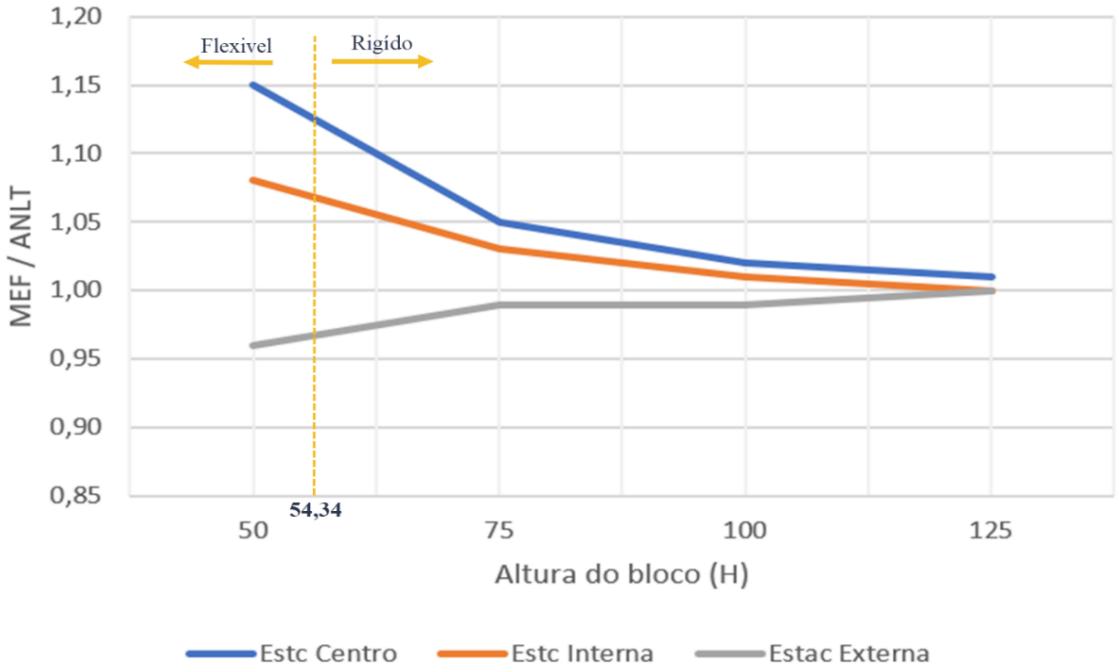
			CARREGAMENTO NAS ESTACA (kN)											
			Altura dos blocos											
			50 cm			75 cm			100 cm			125 cm		
			ANALITÍCO	M.E.F.	M.E.F./ANLT.	ANALITÍCO	M.E.F.	M.E.F./ANLT	ANALITÍCO	M.E.F.	M.E.F./ANLT	ANALITÍCO	M.E.F.	M.E.F./ANLT
NÓ	ESTACA	POSIÇÃO	kN	kN		kN	kN		kN	kN		kN	kN	
1	22	**centro**	158,55	182,12	1,149	167,85	176,19	1,050	177,14	181,08	1,022	186,43	188,67	1,012
5	17		158,55	172,02	1,085	167,85	172,52	1,028	177,14	179,31	1,012	186,43	187,64	1,007
10	16		158,55	172,02	1,085	167,85	172,52	1,028	177,14	179,31	1,012	186,43	187,64	1,007
15	21	**circulo interno**	158,55	172,02	1,085	167,85	172,52	1,028	177,14	179,31	1,012	186,43	187,64	1,007
20	20		158,55	172,02	1,085	167,85	172,52	1,028	177,14	179,31	1,012	186,43	187,64	1,007
25	19		158,55	172,02	1,085	167,85	172,52	1,028	177,14	179,31	1,012	186,43	187,64	1,007
30	18		158,55	172,02	1,085	167,85	172,52	1,028	177,14	179,31	1,012	186,43	187,64	1,007
33	4		158,55	151,65	0,956	167,85	165,44	0,986	177,14	176,02	0,994	186,43	185,80	0,997
35	3		158,55	151,53	0,956	167,85	165,40	0,985	177,14	175,99	0,994	186,43	185,78	0,997
37	2		158,55	151,65	0,956	167,85	165,44	0,986	177,14	176,02	0,994	186,43	185,80	0,997
39	1		158,55	151,58	0,956	167,85	165,41	0,986	177,14	176,00	0,994	186,43	185,79	0,997
41	15		158,55	151,58	0,956	167,85	165,41	0,986	177,14	176,00	0,994	186,43	185,79	0,997
43	14		158,55	151,65	0,956	167,85	165,44	0,986	177,14	176,02	0,994	186,43	185,80	0,997
45	13		158,55	151,53	0,956	167,85	165,40	0,985	177,14	175,99	0,994	186,43	185,78	0,997
47	12		158,55	151,65	0,956	167,85	165,44	0,986	177,14	176,02	0,994	186,43	185,80	0,997
49	11		158,55	151,58	0,956	167,85	165,41	0,986	177,14	176,00	0,994	186,43	185,79	0,997
51	10		158,55	151,58	0,956	167,85	165,41	0,986	177,14	176,00	0,994	186,43	185,79	0,997
53	9		158,55	151,65	0,956	167,85	165,44	0,986	177,14	176,02	0,994	186,43	185,80	0,997
55	8		158,55	151,53	0,956	167,85	165,40	0,985	177,14	175,99	0,994	186,43	185,78	0,997
57	7		158,55	151,65	0,956	167,85	165,44	0,986	177,14	176,02	0,994	186,43	185,80	0,997
59	6		158,55	151,58	0,956	167,85	165,41	0,986	177,14	176,00	0,994	186,43	185,79	0,997
61	5		158,55	151,58	0,956	167,85	165,41	0,986	177,14	176,00	0,994	186,43	185,79	0,997

Fonte: Os autores.

A figura 6 mostra as variações da rigidez devido à altura em função da relação das reações apuradas analiticamente e as obtidas pelo Método dos Elementos Finitos (SAP 2000). A partir da altura de 54,34 cm, os blocos são considerados rígidos e quanto maior a altura as curvas tendem para a relação MEF/ANALT unitário. Observou-se que houve uma grande mudança no comportamento estrutural do bloco quando foi modificado a altura do bloco de estacas, ou seja, quando houvera o aumento da rigidez.

Observou-se a tendência de se atingir a relação MEF /ANLT das estacas interna e da estaca central atingirem o valor unitário (1,00) com altura do bloco de estacas superior a 125 cm.

Figura 6 – Relação entre os carregamentos das estacas M.E.F/ANLT em função da altura do bloco



Fonte: Os autores.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo comparar os comportamentos um bloco de vinte e duas estacas, com quatro rijezas diferentes. Foi observado uma grande diferença entre os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos (método numérico) e os valores obtidos analiticamente pelo método de SCHIEL (1957). Principalmente quando é levado em consideração a interação de estrutura com o solo onde o bloco está apoiado.

Os resultados mostram que a consideração de alguns parâmetros fundamentais, como a altura do bloco, faz que o comportamento estrutural seja alterado, com significativas diferenças de reações nas estacas.

Os resultados mostram também que com aumento na altura do bloco as reações nas estacas tendem a se uniformizar, ou seja, com o aumento da rigidez do bloco diminui as diferenças entre as reações das estacas, acordo com o trabalho de Sivelli (2018).

Os resultados obtidos após a interação solo-estrutura permitem que o projeto estrutural seja dimensionado com mais competência mitigando o possível surgimento de patologias, principalmente devido aos recalques não considerados, prezando o melhor comportamento da estrutura.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnica (2019). NBR 6122: *Projetos e execução de fundações,* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnica (2014). NBR 6118: *Projetos de estruturas de concreto – Procedimentos,* Rio de Janeiro.

Alves, L. F. F. (2013). *Tanques de armazenamento em concreto protendido para petróleo, derivados e biocombustíveis.* Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.dissertacoes.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli596.pdf

Alves, E. C. e Tomaz, A. G. S. (2018). *Dimensionamento ótimo de blocos sobre estacas.* Revista Portuguesa de Dimensionamento de Estruturas, série III, n 8. Disponível em: http://rpee.lnec.pt/Ficheiros/rpee_serieIII_n08/rpee_sIII_n08_pg19_32.pdf

Antoniazzi, J. P. (2011). *Interação Solo-Estrutura em Edifícios com fundações superficiais*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7763

Aoki, N. e Cintra, J. C. (2004). *Notas de aula disciplina SGS-404 Fundações*, Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Aoki, N. e Cintra, J. C. (2005). Introdução ao estudo da interação solo-estrutura. Notas de aula, Aula nº 3. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP.

Aoki, N. e Cintra, J. C. (2010). *Fundações por estacas: projeto geotécnico,* Editora Oficina de Textos, São Paulo.

Azevedo, J. C. (2018). *Análise do comportamento estrutural de blocos rígidos sobre estacas, baseado na análise numérica.* Dissertação de mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.labbas.eng.uerj.br/pgeciv/nova/files/dissertacoes/161.pdf

Chamecki, S. (1954). *Consideração da rigidez da estrutura no cálculo dos recalques de fundação*, separata dos Anais do I Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos – v.1, Porto Alegre.

Cintra, J. C. A. (1998) Fundações em Solos Colapsíveis. São Carlos: EESC/USP.

Colares, G. M. (2006). *Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifício*, Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em: http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/2006ME_GeorgeMouraColares.pdf

Frias, P. H. A. A.; Bahia, G. A. D.; Mota, N. M. B.; Pereira, T. M. (2020). *Modelagem de superfícies para análise de estabilização de recalques na perspectiva da interação solo estrutura.* Brasilian Journal of Development, v.6, n.1. Curitiba.

Gusmão, A. D. (1990). *Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de fundação*, Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Gutierrez, N. H. M.; Nobrega, M. T.; Vilar, O. M. (2004). *Condicionantes estruturais do colapso de um solo argiloso tropical oriundo de basalto no norte do Paraná*. In: Simpósio brasileiro de solos não saturados, Ed.5 – v.2, São Carlos. Disponível em: https://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/anaisnsat/nsat-edicao5-vol2.pdf

Lessa, M. A. De S. (2005). *Influência de índices pluviométricos na umidade de solos tropicais como indicador da sucção aplicado a fundações*. Dissertação de mestrado em geotécnica. Universidade de Brasília.

Magabe, S. B. e Ingle, R. A. (2020). *Analysis methods for pile foundation: a critical review of the literature and recommended suggestion.* Innovative infrastructure Solutions v. 6, n. 14. https://doi.org/10.1007/s41062-020-00367-y

Medero, G. M. (2005). *Comportamento de um solo colapsível artificialmente cimentado*. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/6085

Mendonça, F. R. S. (2012). *Avaliação do efeito da interação solo-estrutura sobre o comportamento estrutural de edifícios em aço e mistas (aço-concreto).* Dissertação de mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.labbas.eng.uerj.br/pgeciv/nova/files/dissertacoes/64.pdf

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.

Montoya, P. J.; Meseguer, A.; Cabre, M. (2000). *Hormigon Armado*. 14ª Edición Basada em EHE ajustada al Código Modelo y al Eurocódigo. Editorial Gustavo Gili SA. Espanha.

Nunes, V. Q. G. (2020). *Análise numérica de blocos de fundação sobre duas, três e cinco estacas com redução das propriedades mecânicas do concreto devido à RAA*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: https://attena.ufpe.br/bitstream/123456789/37730/1/TESE%20Valmiro%20Qu%c3%a9fren%20Gameleira%20Nunes.pdf

Porto, T. B.; Silva, R. M. (2010) Study of a structural masonry building with the analysis of soil-structure interaction. Mecánica Computacional v. XXIX. Disponível em: https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/3103

Ramos, F. A. C.; Gionco, J. S. (2009). *Análise das reações nas estacas em blocos com pilares submetidos à ação de força centrada e excêntrica considerando a interação solo-estrutura,* Cadernos de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, v. 11, n. 50, São Carlos.

Rasi, J. R.; Aguiar, M. F. P.; Verissimo, S. F.; Mendes, G. C. M.; Prado, S. C. (2019) *Análise das causas de colapso do subsolo e soluções adotadas em fundações de edifício industrial.* 9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE 9. São Paulo. Disponível em: http://proevento.com.br/sefe9/trabalhos/ler/86.html

Rasi, J. R.; Caunetto, D.; Broetto, J. F. (2020a). *Alternativas estruturais em fundos suspensos de tanques metálicos tubulares com duas células para reservação de água*. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, v.12, n.5. São Paulo. Disponível em: https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/alternativas-estruturais

Rasi, J. R.; Caunetto, D.; Broetto, J. F. (2020b). ***Tanque metálico para reservação de água no Brasil: um estudo da aplicação parcial da norma API 650***. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, v.1, n.5. São Paulo. Disponível em: https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/tanque-metalico

Rasi, J. R.; Serafim, J. A.; Mazer, W.; Broetto, J. F. (2020c). *Análise das reações nas estacas em bloco de concreto considerando a interação solo-estrutura.* Brazilian Journal of Development, v.6, n.6. Curitiba. https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-616

Schiel, F. (1957). *Estática das construções*, publicação n. 10 da Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Silva, R. L. C. (2017). *Contribuição ao projeto de reservatório cilíndrico de concreto armado apoiado em base deformável.* Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Alagoas. Disponível em: http://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/2022/1/Contribui%c3%a7%c3%a3o%20ao%20projeto%20de%20reservat%c3%b3rios%20cil%c3%adndricos%20de%20concreto%20armado%20apoiados%20em%20base%20deform%c3%a1vel.pdf

Sivelli, M. G. (2018). *Interação solo-estrutura no projeto estrutural de edifício de múltiplos andares*, Trabalho de conclusão de curso, Faculdade de Engenharia da Universidade de Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Sousa, G. F (2019). *Análise numérica de blocos sobre duas estacas considerando o atrito lateral entre as estacas e o solo*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/27051/1/An%C3%A1liseNum%C3%A9ricaBlocos.pdf

Velloso, D. A.; Lopes, F. R. (2009). *Fundações*, Editora Oficina de Textos, São Paulo.