



Efeito de Grupo de Estacas: Análise Comparativa do Comportamento de Estacas Cravadas Metálicas e Escavadas Tipo Hélice Contínua em Fundações de Tanques

Yani Gonçalves Pereira ¹

Engenheira Civil, Construtora Mozak, Rio de Janeiro, Brasil, yani.pereira@mozak.com.br

Rubenei Novais Souza ²

Engenheiro Civil, PETROBRAS, Rio de Janeiro, Brasil, rubenei@petrobras.com.br

RESUMO: Este trabalho apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre os principais métodos de análise do efeito de grupo de estacas e propõe uma nova metodologia, analítica, simples e representativa, a qual é aplicada às fundações de dois tanques de derivados de petróleo, uma formada por 595 estacas escavadas tipo hélice contínua com 60 cm de diâmetro e 23 m de comprimento e outra por 595 estacas metálicas HP250x62 cravadas até 25 m a 30 m de profundidade, atingindo fronteira rígida. Em ambos os tanques foram realizadas provas de carga estática em estacas isoladas e testes hidrostáticos dos tanques, os quais solicitam simultaneamente todas as respectivas estacas até aproximadamente a carga de trabalho. Os resultados obtidos comprovam a representatividade da nova metodologia proposta e mostram que na fundação em estacas hélice contínua, espaçadas de 2,0 m e apoiadas em camada de argila siltosa rija a dura, ocorreu efeito de grupo significativo, com o tanque atingindo recalque cerca de 30 vezes o observado na estaca isolada para o mesmo nível de carregamento. Já na fundação em estacas metálicas, com o mesmo espaçamento, porém apoiadas em camada impenetrável ao trépano na sondagem a percussão, o efeito de grupo foi desprezível.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações em estacas, efeito de grupo, previsão de recalques.

ABSTRACT: This paper presents a brief research on the main methods of the pile group effect analysis and proposes a new, analytical and relatively simple methodology which is applied to the foundations of two tanks of petroleum products, one formed by 595 continuous flight auger piles of 60 cm diameter and 23 m deep and another by 595 driven steel HP250x62 piles 25 m deep. In both tanks were performed static load tests on isolated piles and hydrostatic tests on the tanks, which loaded simultaneously all the respective piles up to the design load. The results of the analyses show that for the continuous flight auger with spacing of 2.0 m between them, supported by a layer of hard silty clay, there was a significant group effect, maximizing the tank settlement related to the observed on the isolated pile for the same loading level. In the driven steel piles, with the same spacing, but supported on impenetrable layer, the group effect was negligible.

KEYWORDS: Piles foundations, group effect, settlement estimate.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1 Introdução

A carga vertical aplicada no topo de uma estaca é distribuída ao solo ao longo do fuste, por atrito lateral, e na ponta, por compressão da camada inferior. Como o solo é um sistema particulado, o mecanismo de mobilização de ambas as parcelas de resistência implica um espriamento de tensões verticais às camadas subjacentes, resultando que, ao longo da profundidade, há um aumento da área no entorno da estaca afetada pelo carregamento distribuído e uma redução da tensão vertical espriada. Quando a estaca é solicitada isoladamente, como em uma prova de carga estática, todo este mecanismo tende a ser representado na sua curva carga-recalque do topo. Entretanto, quando solicitada em grupo de estacas, como ocorre na maioria dos casos práticos, a curva carga vertical por estaca *versus* recalque do topo pode ser substancialmente diferente, dependendo do perfil do subsolo, das características da estaca e do espaçamento entre elas. Este é o aspecto principal do chamado efeito de grupo de estacas, que alguns autores analisam em termos de capacidade de carga, mas em projetos correntes é mais pertinente a análise em termos de recalque das estacas, uma vez que esta abordagem possibilita antecipar o conhecimento de eventuais recalques excessivos que prejudicariam o desempenho da fundação projetada.

Tendo em vista subsidiar a análise do efeito de grupo de estacas como parte da estimativa dos recalques esperados para a fundação, de modo a evitar casos em que empreendedores, construtores e projetistas são surpreendidos com recalques excessivos de fundações estaqueadas, este trabalho, resultado do projeto de conclusão de curso de Engenharia Civil de Pereira (2022), apresenta a proposta de uma nova metodologia que incorpora conhecimentos consagrados da engenharia de fundações, a saber a estimativa da curva carga-recalque de estacas isoladas, análise da propagação de tensões verticais no maciço e funcionamento conjunto do bloco de coroamento e das estacas como *radier* estaqueado. A representatividade da metodologia proposta é verificada na sua aplicação às fundações de dois tanques de derivados de petróleo, uma formada por 595 estacas escavadas tipo hélice contínua com 60 cm de diâmetro e 23 m de comprimento e outra por 595 estacas metálicas HP250x62 cravadas até 25 m a 30 m de profundidade, atingindo fronteira rígida. Em ambos os casos se contou com resultados de provas de carga estática em estacas isoladas e testes hidrostáticos dos tanques.

2 Efeito de Grupo de Estacas

Segundo a NBR 6122:2019, o efeito de grupo pode ser descrito como a interação entre as diversas estacas ou tubulões constituintes de uma fundação durante a transmissão ao terreno das cargas que lhes são aplicadas. Esta interação ocasiona uma superposição de tensões verticais no maciço fazendo com que o recalque do grupo, dependendo de certas características do maciço e da fundação, seja diferente daquele que seria observado no elemento isolado. Chan (2006) aponta que os principais aspectos que influenciam o efeito de grupo de estacas são:

- Método de instalação das estacas, com ou sem deslocamento do solo;
- Modo dominante de transferência de carga, por atrito ou pela ponta;
- Rigidez do solo de fundação;
- Geometria da configuração do grupo de estacas;
- Rigidez relativa do bloco, das estacas e do solo.

Na análise do efeito de grupo em termos do recalque das estacas, é usual expressá-lo por meio de um fator α denominado razão de recalque (Cintra e Aoki, 2010):

$$\rho_g = \alpha \rho_i \quad (1)$$

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



em que ρ_g é o recalque do grupo e ρ_i é o recalque de uma estaca isolada.

Cintra e Aoki (2010) comentam que algumas fórmulas simples para a estimativa do fator α , considerando exclusivamente parâmetros geométricos do grupo de estacas, estão disponíveis na literatura técnica, porém a sua representatividade é questionável, uma vez excluem variáveis importantes como a deformabilidade e a espessura do estrato de solo compreendido entre a ponta das estacas e o indeslocável. Os autores citam alguns casos de obras em que grandes grupos de estacas sofreram recalques da mesma magnitude que uma estaca isolada sofreria, pois, estavam próximas a uma camada indeslocável.

Bowles (1997) considera que em agrupamento de estacas espera-se que as tensões no solo produzidas pela resistência lateral ou de ponta se sobreponham, resultando que o carregamento e o espaçamento entre as estacas determinam a intensidade dessa superposição.

Lopes e Velloso (2004) apontam o espaçamento entre estacas como a variável mais relevante para o efeito de grupo, indicando que blocos com estacas espaçadas menos que 2,5 a 3,0 vezes do diâmetro tendem a carregar mais as suas estacas periféricas. Embora já esteja claro que o espaçamento entre estacas é apenas uma das variáveis que condicionam o mecanismo, a constatação de cargas maiores nas estacas periféricas é condizente com a sua maior rigidez geotécnica decorrente dos maiores recalques esperados para as estacas centrais.

Depreende-se do exposto que uma metodologia representativa para a estimativa do recalque do bloco de estacas e, conseqüentemente, do efeito de grupo, deve contemplar a previsão do recalque da camada subjacente à ponta da estaca de referência provocado pela tensão vertical propagada pela resistência por atrito e de ponta mobilizada nas estacas vizinhas, para a carga considerada. O recalque médio do bloco será aproximadamente igual à soma desse recalque com o recalque previsto para a estaca na condição isolada.

3 Metodologia de Análise Proposta

A metodologia de análise proposta é baseada na consideração da propagação das tensões verticais decorrentes das resistências por atrito e de ponta mobilizadas nas estacas e do funcionamento conjunto do bloco de coroamento e das estacas como um *radier* estaqueado. Assim, o procedimento a ser aplicado deve contemplar o seguinte:

1. Estimativa das parcelas de resistência por atrito e de ponta da estaca;
2. Estimativa da curva carga-recalque da estaca isolada;
3. Estimativa da rigidez geotécnica do bloco de coroamento funcionando como sapata;
4. Estimativa das parcelas de resistência por atrito e de ponta mobilizadas para a carga de trabalho adotada para as estacas;
5. Estimativa da tensão vertical propagada no nível da ponta e na coordenada da estaca de referência devida à sua própria resistência por atrito e às parcelas de resistência por atrito e de ponta das estacas vizinhas;
6. Estimativa do recalque provocado pela tensão vertical estimada no item 5 na camada compressível entre a ponta da estaca de referência e a fronteira rígida;
7. Cálculo do recalque do topo da estaca de referência somando o recalque calculado no item 6 e o recalque da estaca isolada para a carga de trabalho;
8. Estimativa da tensão distribuída diretamente ao solo pelo bloco funcionando como sapata, levando em conta o recalque total estimado do topo da estaca e a rigidez geotécnica estimada do bloco;
9. Estimativa do recalque provocado pela tensão vertical propagada no nível da ponta da estaca de referência, devida à reação mobilizada pelo bloco funcionando como sapata, na camada compressível entre a ponta da estaca de referência e a fronteira rígida;

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





10. Cálculo do novo recalque do topo da estaca de referência somando o recalque estimado no item 9 e o recalque calculado no item 7;
11. Cálculo da nova carga de trabalho a estaca de referência levando em conta que parte da carga do bloco é distribuída diretamente ao solo;
12. Repetição dos passos 4 a 12 até convergência.

Como pode ser observado no procedimento apresentado, a metodologia proposta não leva em conta a influência da interação entre as estacas vizinhas na mobilização da resistência por atrito. Tal influência aparentemente é pequena, pelo menos para os espaçamentos típicos adotados nos projetos correntes. Além disso, pode-se discutir que a tensão vertical propagada no nível da ponta da estaca de referência devida à sua própria resistência por atrito mobilizada já estaria considerada na curva carga-recalque do topo estimada ou medida. Ocorre que a prática tem mostrado que, provavelmente devido à influência do tempo de duração do carregamento e da atuação conjunta do grupo de estacas, aumentando a área carregada no nível da ponta das estacas, há um recalque adicional do grupo de estacas associado a esta parcela de tensão vertical propagada.

Na aplicação da metodologia proposta, seguindo o procedimento apresentado, as estimativas das parcelas de resistência por atrito e de ponta e do recalque da estaca podem ser baseadas nos métodos semi-empíricos consagrados, a propagação de tensões verticais pode ser obtida aplicando a solução de Boussinesq e a estimativa de recalque do solo a partir dos métodos baseados na teoria da elasticidade.

4 Aplicação da Metodologia de Análise Proposta

A execução e teste das fundações estaqueadas de dois tanques de derivados de petróleo em uma unidade industrial no estado de Pernambuco propiciou a oportunidade de verificação da representatividade da metodologia proposta. Os tanques têm diâmetro de 53,44 m e altura de 14,72 m. A Figura 2 apresenta a planta de implantação dos referidos tanques e a locação das sondagens a percussão realizadas. Embora os tanques sejam próximos, o subsolo local é bem variável. Na área do TQ-62025 o subsolo apresenta uma camada superior de silte argilo-arenoso com cerca de 15 m de espessura e índice N_{SPT} variando predominantemente de 3 a 20 golpes, seguida por camada de argila silto-arenosa até o limite das sondagens ao cerca de 30 m, com índice N_{SPT} variando predominantemente de 20 a 50 golpes. Na área do TQ-62026 o subsolo é constituído predominantemente por uma camada de aterro de silte argilo-arenoso com cerca de 15 m de espessura e índice N_{SPT} variando entre 10 e 20 golpes, seguida por camada de argila silto-arenosa com matéria orgânica com cerca de 7 m de espessura e índice N_{SPT} variável próximo de 10 golpes, seguida por camada de silte areno-argiloso até o limite das sondagens, impenetrável ao trépano, aos cerca de 25m a 30 m.

Em consequência da grande heterogeneidade do subsolo local, as fundações executadas para os dois tanques foram distintas. A fundação do TQ-62025 foi executada com 595 estacas hélice contínua com diâmetro de 60 cm e comprimento de 23 m para até 1150 kN de carga de trabalho e a do TQ-62026 com 595 estacas metálicas HP250x62, cravadas até negas fechadas, atingindo comprimentos variáveis entre cerca de 25 m e 30 m, para até 900 kN de carga de trabalho. Em ambos os casos o estaqueamento foi coroado com uma laje de concreto armado de 0,70 m de espessura sobre a qual o tanque metálico foi apoiado.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



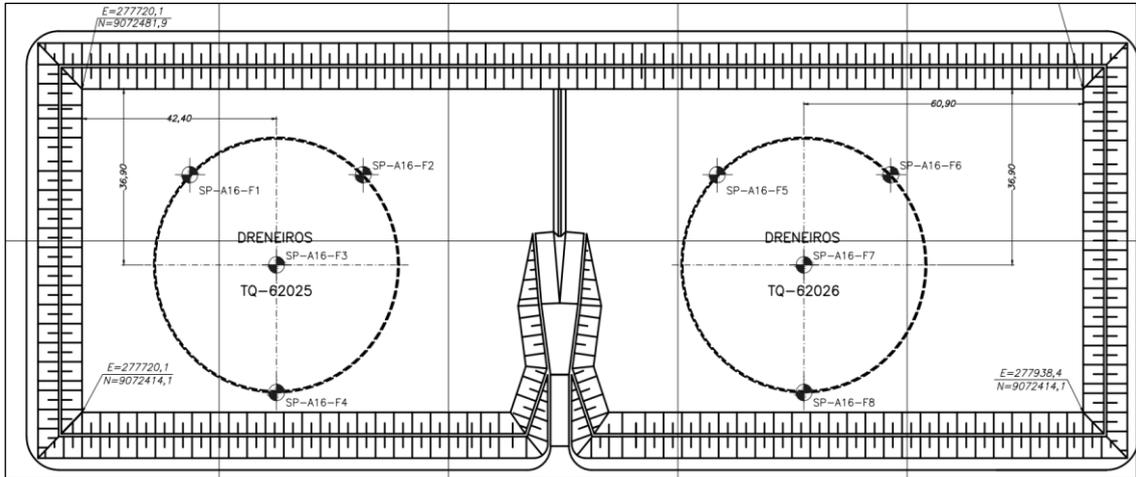


Figura 1: Planta de implantação dos tanques analisados.

A aplicação da metodologia proposta consiste em seguir o procedimento apresentado no item 3 deste trabalho. Contudo, como no caso em estudo se dispõe de diversas provas de carga estática em estacas isoladas, os passos 1 e 2 do procedimento são desnecessários, devendo-se ter em conta que os possíveis erros na estimativa das parcelas de resistência por atrito e de ponta e da curva carga-recalque do topo da estaca, que evidentemente afetariam o resultado final do recalque previsto do bloco em um projeto típico, não terão lugar nesta verificação. As Figuras 2 e 3 apresentam as plantas dos estaqueamentos e as curvas carga-recalque do topo das estacas hélice contínua e metálicas testadas. Como pode ser observado, as estacas testadas apresentaram curvas muito próximas em cada tanque.

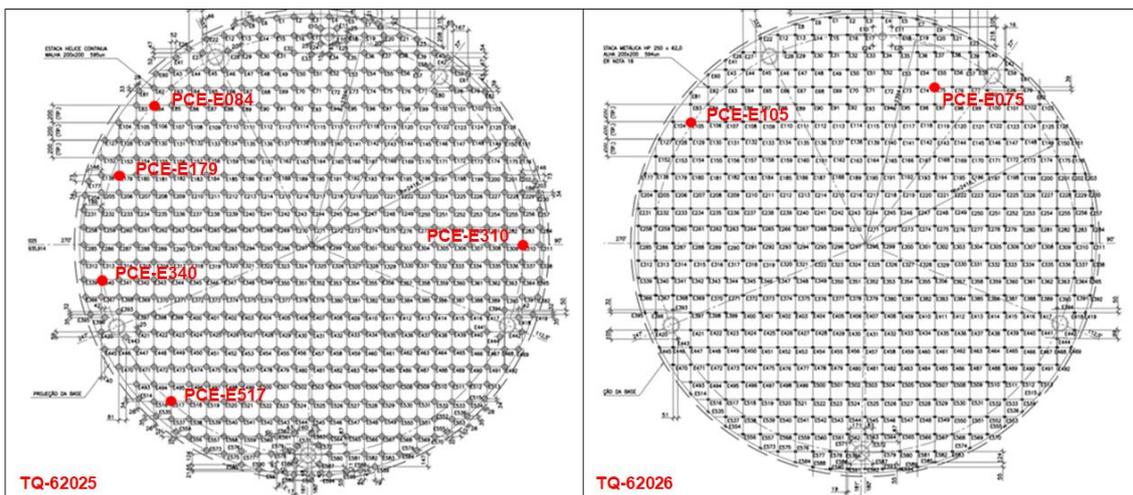


Figura 2: Plantas do estaqueamento dos tanques TQ-62025 (estacas hélice contínua) e TQ-62026 (estacas metálicas) com indicação em vermelho das estacas testadas em provas de carga estática.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



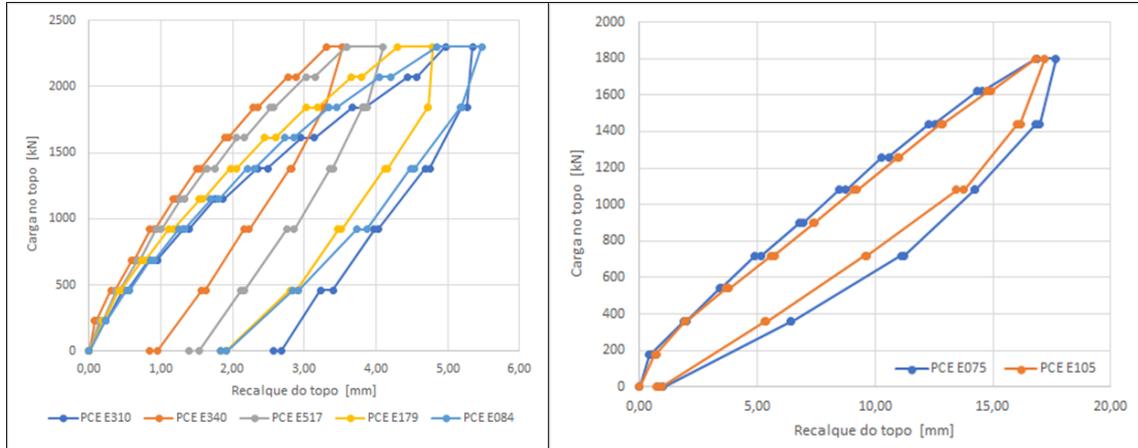


Figura 3: Curvas carga-recalque do topo das estacas hélice contínua e metálicas testadas isoladamente nos tanques TQ-62025 e TQ-62026 respectivamente.

4.1 Estimativa da Rigidez Geotécnica dos Radiers

O passo 3 do procedimento proposto é a estimativa da rigidez geotécnica da laje de coroamento das estacas funcionando como fundação superficial, a qual pode ser obtida a partir da estimativa do recalque que essas lajes apresentariam para a tensão vertical aplicada pelos tanques e quantificar a relação tensão vertical-recalque. A Figura 4 apresenta os modelos do subsolo adotados para esta estimativa, que foi baseada na aplicação da teoria da elasticidade para carregamentos de grandes extensões, parâmetros elásticos estimados conforme Teixeira (1996) e tensão vertical média em cada camada calculada considerando o espraio da tensão vertical segundo um ângulo de 30° com vertical.

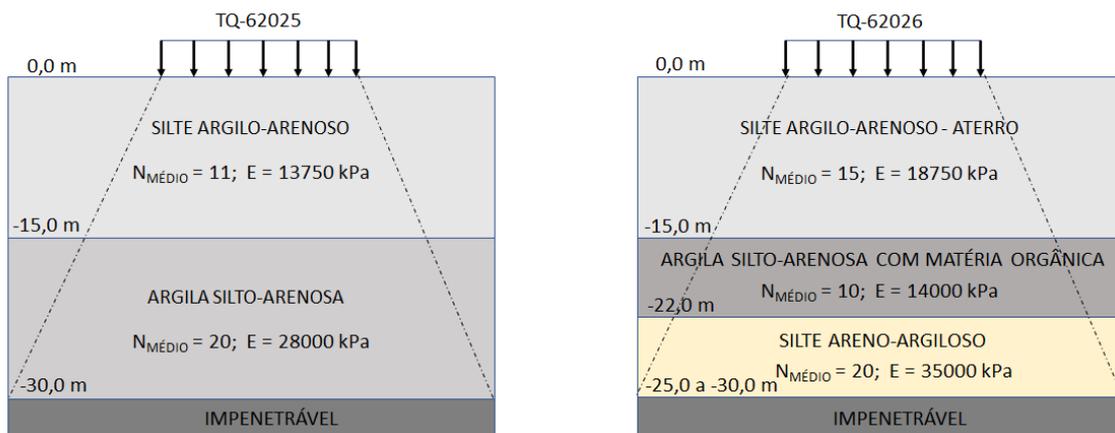


Figura 4: Modelo de espraio da tensão vertical aplicada na base dos tanques.

a) TQ-62025

$$r = \frac{\sigma_{v,média,1} \times H_1}{E_1} + \frac{\sigma_{v,média,2} \times H_2}{E_2} = \frac{122kPa \times 15m}{13750kPa} + \frac{75kPa \times 15m}{28000kPa} = 0,173m \quad (2)$$

$$k_{v,radier} = \frac{\sigma_{v,aplicada}}{r} = \frac{165kPa}{0,173m} = 952kPa/m \quad (3)$$

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



b) TQ-62026

$$r = \frac{\sigma_{v,média,1} \times H_1}{E_1} + \frac{\sigma_{v,média,2} \times H_2}{E_2} + \frac{\sigma_{v,média,3} \times H_3}{E_3} \quad (4)$$

$$r = \frac{122kPa \times 15m}{18750kPa} + \frac{84kPa \times 7m}{14000kPa} + \frac{68kPa \times 5m}{35000kPa} = 0,149m \quad (4)$$

$$k_{v,radier} = \frac{\sigma_{v,aplicada}}{r} = \frac{165kPa}{0,149m} = 1105kPa/m \quad (5)$$

4.2 Estimativa das Parcelas de Resistência por Atrito e de Ponta das Estacas Mobilizadas

O passo 4 do procedimento proposto é a estimativa das parcelas de resistência por atrito e de ponta da estaca mobilizadas para equilíbrio da carga de trabalho. Considerando o tanque cheio d'água e o peso próprio da laje de coroamento, verifica-se a tensão vertical atuante no nível do topo das estacas é aproximadamente 165 kPa, resultando em uma carga vertical média nas estacas de 660 kN. Tendo como base a estimativa da capacidade de carga das estacas pelo método de Décourt (1996) e também a curvas carga-recalque do topo das estacas obtidas nas provas de carga estática, pode-se concluir que é representativo admitir que, em ambos os tanques, toda a carga aplicada nas estacas até o nível da carga de trabalho é distribuída por atrito lateral.

4.3 Estimativa da Tensão Vertical Propagada no Nível da Ponta da Estaca

O passo 5 do procedimento proposto é a estimativa da tensão vertical propagada no nível da ponta e na coordenada da estaca de referência devida à sua própria resistência por atrito e às parcelas de resistência por atrito e de ponta das estacas vizinhas. Esta tensão vertical vai provocar um recalque da camada compressível sob a ponta e, portanto, uma translação da estaca adicional à sua curva carga-recalque do topo prevista ou medida como elemento solicitado isoladamente.

A equação de Boussinesq permite obter a tensão vertical propagada em qualquer ponto do maciço devida a uma carga vertical concentrada aplicada na superfície do terreno, Pinto (2000). Esta equação pode ser adotada para a estimativa aproximada da tensão vertical propagada em decorrência da aplicação de uma carga vertical concentrada em um ponto do maciço:

$$\sigma_v = \frac{Q}{\pi \times z^2} \times \frac{\frac{3}{2}}{\left(1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right)^{\frac{5}{2}}} \quad (6)$$

onde:

Q = carga vertical concentrada

z = distância vertical entre o ponto de aplicação da carga e o de propagação da tensão vertical

r = distância radial entre o ponto de aplicação da carga e o de propagação da tensão vertical

A Figura 2 mostra que, considerando apenas as estacas imediatamente próximas, uma estaca de referência mais central no bloco tem 8 estacas vizinhas, sendo 4 com espaçamento de 2,00 m e 4 com espaçamento de 2,83 m. Admitindo um modelo simplificado em que a resistência por atrito é uniforme ao longo da profundidade, o que implica a carga distribuída em cada metro do fuste da estaca ser a mesma ao longo de todo o seu comprimento, é possível estimar, pela equação de Boussinesq, a tensão vertical propagada no nível da ponta da estaca de referência. Como é intuitivo, essa estimativa mostra que a influência mais significativa é a propagação da

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



tensão vertical decorrente da resistência por atrito lateral mobilizado na própria estaca analisada. Além disso, quanto mais distante a estaca, menor a sua influência, e a carga distribuída por atrito no trecho superior das estacas gera carregamento vertical de pequena monta no nível da ponta da estaca analisada, o que é condizente com o comportamento esperado do grupo de estacas. No tanque TQ-62025, as tensões verticais propagadas no nível da ponta da estaca de referência foram 35,82 kPa devido à sua própria resistência por atrito lateral e 4,21 kPa e 2,69 kPa devidas a cada estaca vizinha espaçada de 2,00 m e 2,83 m respectivamente. No tanque TQ-62026 esses valores foram 30,59 kPa, 3,67 kPa e 2,37 kPa. A partir dessas parcelas de tensões verticais propagadas, é possível calcular a tensão vertical total propagada no nível da ponta da estaca de referência devida às 8 estacas vizinhas mais próximas, dada por:

$$TQ-62025 \rightarrow \sigma_{v,total} = 35,82kPa + 4 \times 4,21kPa + 4 \times 2,69kPa = 63,42kPa$$

$$TQ-62026 \rightarrow \sigma_{v,total} = 30,59kPa + 4 \times 3,67kPa + 4 \times 2,37kPa = 54,75kPa$$

Embora as estacas vizinhas mais distantes tenham, individualmente, pequena influência, em conjunto elas têm impacto significativo. No caso de se considerar as 48 estacas vizinhas mais próximas, é possível mostrar que as tensões verticais propagadas no nível da ponta da estaca de referência indicadas acima aumentam respectivamente para 107 kPa e 92 kPa.

4.4 Estimativa do Recalque do Grupo de Estacas

Os passos 6 a 10 do procedimento proposto permitem estimar o recalque esperado do grupo de estacas. Inicialmente pode-se estimar a compressão da camada entre a ponta da estaca e a fronteira rígida devida à tensão vertical propagada no nível da ponta da estaca, que no caso do tanque TQ-62026 é nula como se pode inferir da análise da Figura 5.

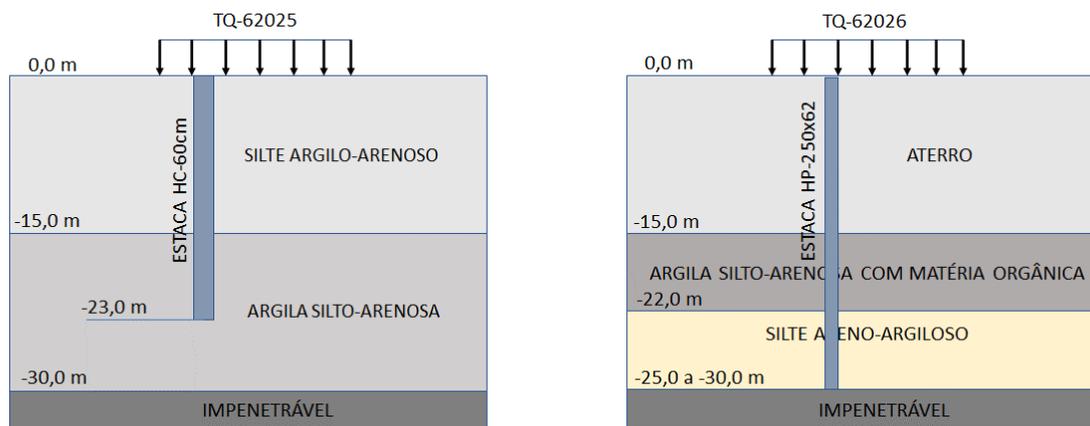


Figura 5: Representação esquemática das estacas no perfil do subsolo

No tanque TQ-62025, em que as estacas estão apoiadas em camada resistente, mas ainda compressível em face do acréscimo de tensão vertical aplicado, é interessante analisar o comportamento do grupo de estacas no centro e na periferia do tanque. Considerando inicialmente a região do centro do tanque, pode-se admitir uma estaca de referência com influência de 48 estacas vizinhas, condição que implica uma tensão vertical total no nível da ponta da estaca de 107 kPa, conforme já mencionado. Neste caso, a compressão da camada sob a ponta da estaca de referência devida à tensão vertical propagada pode ser estimada por:

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





$$r = \frac{107kPa}{28000kPa} \times 7m = 0,027m = 27mm \quad (7)$$

Na região da periferia do tanque, pode-se admitir que o número de estacas vizinhas a propagar tensão vertical significativa no nível da ponta da estaca de referência será a metade do que ocorre na estaca central, resultando que, de forma aproximada, a compressão da camada sob a ponta da estaca de referência devida à tensão vertical propagada pode ser estimada por:

$$r = \frac{54kPa}{28000kPa} \times 7m = 0,014m = 14mm \quad (8)$$

Os recalques acima devem ser somados ao recalque estimado ou medido do topo da estaca solicitada isoladamente pela mesma carga de 660 kN, pois representa uma translação adicional da estaca. Como as curvas carga-recalque das estacas ensaiadas mostram um recalque de aproximadamente 1 mm para este nível de carregamento, pode-se admitir preliminarmente que as estacas mais centrais do tanque apresentarão recalque de cerca de 28 mm e as estacas da periferia cerca de 15 mm. Contudo, quando se aporta o conceito de radier estaqueado, segundo o qual o bloco de coroamento, tendo o mesmo recalque que o topo das estacas, mobiliza uma reação vertical no solo superficial proporcional à sua rigidez geotécnica, aumentando as tensões verticais no maciço e, conseqüentemente, provocando deformações, as quais podem ser estimadas por:

- Reação vertical mobilizada pela laje de coroamento do TQ-62025:

$$\text{Centro} \rightarrow \sigma_{v,reação,superf} = k_v \times r = \frac{952kPa}{m} \times 0,028m = 27kPa$$

$$\text{Periferia} \rightarrow \sigma_{v,reação,superf} = k_v \times r = \frac{952kPa}{m} \times 0,014m = 13kPa$$

- Acréscimo de tensão vertical no nível da ponta das estacas do TQ-62025 devido à reação vertical mobilizada pela laje de coroamento:

$$\text{Centro} \rightarrow \Delta\sigma_{v,reação,23m} \approx 27kPa \times \frac{2243m^2}{5026m^2} = 12kPa$$

$$\text{Periferia} \rightarrow \Delta\sigma_{v,reação,23m} \approx 12kPa \times \frac{2243m^2}{5026m^2} = 6kPa$$

- Recalque adicional aproximado no nível da ponta das estacas do TQ-62025:

$$\text{Centro} \rightarrow r = \frac{12kPa}{28000kPa} \times 7m = 0,003m = 3mm$$

$$\text{Periferia} \rightarrow r = \frac{6kPa}{28000kPa} \times 7m = 0,001m = 1mm$$

Depreende-se do exposto que o recalque estimado do grupo de estacas na região central do tanque TQ-62025 para a carga do teste hidrostático é de 31 mm, resultando em razão de recalque α igual a 31, e do TQ-62026 é o próprio recalque medido nas provas de carga estática das estacas isoladas, cerca de 5 mm, razão de recalque α igual a 1. No caso do TQ-62025 pode-se discutir que uma nova iteração de cálculo da reação vertical mobilizada pela laje de coroamento mostraria um valor maior em função do recalque adicional de 3 mm, provocando um pouco mais de recalque do conjunto, mas deve-se atentar para o fato de que a mobilização de uma reação vertical adicional no radier resulta em alívio da carga atuante nas estacas, reduzindo o recalque destas, efeitos que

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



tendem a se compensar, dispensando maior detalhamento deste cálculo. Contudo, há uma questão mais relevante nesta estimativa, associada à flexibilidade do bloco de coroamento, que precisa ser analisada.

4.5 Análise da Influência da Flexibilidade do Bloco de Coroamento das Estacas

A estimativa do recalque do grupo de estacas apresentada no item anterior considerou algumas simplificações relativas ao espriamento e propagação de tensões verticais no maciço e é condizente com o comportamento de um bloco de coroamento flexível, o qual não limita ou condiciona o recalque das estacas. Esta condição é especialmente representativa no caso de projetos de tanques de armazenamento estaqueados, como os do caso estudado. Entretanto, quando o bloco de coroamento das estacas é do tipo rígido, cuja deformação é muito pequena ou nula, há uma uniformização dos recalques das estacas que resulta em uma certa redistribuição de carga sobrecarregando as estacas da periferia em face da sua maior rigidez geotécnica.

5 Teste Hidrostático dos Tanques

Os tanques TQ-62025 e TQ-62026 foram submetidos a teste hidrostático, o que consiste no seu enchimento completo com água, ao longo do qual são realizadas leituras de recalques em diversos pinos igualmente espaçados ao longo do perímetro da base do tanque, sendo o pino número 1 fixado na direção norte e a numeração dos pinos crescente no sentido horário. Ao longo do esvaziamento também são realizadas leituras de recalque. No TQ-62025 as leituras dos 17 pinos indicaram recalques de 9 mm a 21 mm para o tanque cheio, com um valor médio de 16 mm, e 6 mm a 19 mm após o esvaziamento, com um valor médio de 13 mm. No TQ-62026 as leituras dos 17 pinos indicaram recalques de 5 mm a 8 mm para o tanque cheio, com um valor médio de 6 mm, e 1 mm a 6 mm após o esvaziamento, com um valor médio de 4 mm. O procedimento também contempla a leitura do recalque residual, após esvaziamento, do centro do tanque, mas devido às deformações ascendentes que a chapa metálica do fundo do tanque, apoiada sobre a laje de concreto, costuma apresentar, essa leitura tende a não ser confiável como medida de recalque residual do centro do tanque. Para essa leitura foram registrados recalque de 28 mm para o TQ-62025, o que é plausível, e levantamento de 1 mm para o TQ-62026, o que evidentemente é implausível. Considerando que o retorno de 3 mm do recalque da periferia do TQ-62025 também tenha ocorrido no centro, pode-se inferir que o recalque total no centro desse tanque atingiu cerca de 31 mm.

6 Comparação Entre os Recalques Estimados e os Medidos nos Testes Hidrostáticos

Conforme exposto no item 4.4, o recalque estimado para o grupo de estacas na região central do tanque TQ-62025 foi de 31 mm e na periferia, 15 mm. Esta estimativa mostra um efeito de grupo significativo, com a razão de recalque atingindo um valor de até 31, isto é, o recalque do grupo de estacas é 31 vezes maior que o recalque da estaca isolada para a mesma carga. No tanque TQ-62026, o recalque previsto do grupo de estacas foi o próprio recalque medido nas provas de carga estática das estacas isoladas, cerca de 5 mm, portanto com efeito de grupo desprezível.

Os recalques medidos nos testes hidrostáticos, indicando um valor médio na periferia de 16 mm no TQ-62025 e 6 mm no TQ-62026, confirmam as estimativas baseadas na metodologia proposta e também a constatação apresentada por Cintra e Aoki (2010), segundo a qual não é esperado efeito de grupo significativo em estacas cravadas até o impenetrável.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



7 Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia de previsão do recalque do grupo de estacas que leva em conta a curva carga-recalque do topo da estaca isolada, a tensão vertical no nível da ponta das estacas devida à propagação da carga distribuída por atrito lateral na estaca analisada e suas vizinhas, e o funcionamento do bloco de coroamento como *radier* estaqueado. A aplicação da metodologia ao caso real das fundações de dois tanques de derivados de petróleo, um apoiado em estacas escavadas tipo hélice contínua com ponta em argila dura e outro em estacas metálicas cravadas até o impenetrável, mostrou que a metodologia proposta possibilita uma previsão representativa do efeito de grupo de estacas.

A metodologia proposta e os dados experimentais analisados também possibilitaram comprovar que em grupos de estacas cravadas até o impenetrável o efeito de grupo é desprezível, como apontado por alguns autores, como Cintra e Aoki (2010). Esta condição decorre principalmente do fato de que as cargas distribuídas por atrito pelas diversas estacas e propagadas até o nível da ponta das estacas são insuficientes para comprimir significativamente o maciço subjacente de elevada rigidez, resultando que em estacas escavadas perfuradas até o impenetrável ao trépano também é esperado efeito de grupo desprezível.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à PETROBRAS pelo permanente estímulo ao avanço do conhecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010. NBR 6122 - Projeto e execução de fundações.
- Bowles, J.E. (1997). *Foundation Analysis and Design*. Singapore: The McGraw-Hill Companies. 1207 p.
- Chan, R. K. S. (2006). Foundation design and construction. *Geo Publication*, n. 1. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region. Hong Kong.
- Cintra, J.C.A. e Aoki, N. (2010). *Fundações por estacas*. Oficina de textos, São Paulo.
- Décourt, L in Hachich, W. et al. (1996). *Fundações: teoria e prática*. 1ª edição, Pini, ABMS/ABEF, São Paulo.
- Lopes, F.R. e Velloso, D. (2004). *Fundações*. Oficina de textos, São Paulo.
- Pereira, Y.G. (2022). *Efeito de grupo de estacas: análise comparativa do comportamento de estacas cravadas metálicas e escavadas tipo hélice contínua em fundações de tanques*. Projeto de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado à Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro.
- Pinto, C. S. (2000). *Curso básico de mecânica dos solos*. Oficina de textos, São Paulo.
- Teixeira, A.H. in Hachich, W. et al. (1996). *Fundações: teoria e prática*. 1ª edição, Pini, ABMS/ABEF, São Paulo.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

