

Adrian Pamplona de Sena Tavares

UNISUAM

Helber Pereira Taboza

UNISUAM

Rachel Cristina Santos Pires

UNISUAM

RESUMO

Este artigo utiliza como base pesquisas demonstrando como funciona o efeito de atrito negativo na sua forma teórica, que ocorre geralmente em fundações profundas cravadas em solos argilosos. O atrito negativo ocorre em casos onde o recalque apresentado pela estaca é inferior ao recalque do solo presente está em volta desta estaca, provocando assim esforços axiais adicionais e sobrecargas, visto que o solo para de contribuir com a capacidade de carga dessa fundação passando a ser um peso aplicado ao longo do fuste da estaca. É apresentado ao longo deste artigo os diversos motivos que podem desencadear esse efeito, como a cravação das estacas que causa o amolgamento do solo, fatores característicos da camada compressível e por consequência de técnicas de rebaixamento de nível d'água em solos que possuem baixa permeabilidade, também é apresentado métodos desenvolvidos para estimar este efeito e medidas possíveis para a reduzir o atrito negativo e minimizar as sobrecargas, baseado em estudos, pesquisas e experimentos realizados por vários autores.

Palavras-Chave: Atrito; Negativo; Estacas; Argila; Solo.

INTRODUÇÃO

Quando se pensa em construção civil, não se pode deixar de pensar em solos, já que ele está presente em diversas situações, desde apoio para todo tipo de edificação até servindo de matéria prima para diversos materiais empregados em uma construção, nesse caso, basta pensar em uma edificação para perceber que ela, grande parte das vezes, terá suas fundações apoiadas no solo. Com a finalidade de que a fundação dessa edificação seja executada com segurança, não se pode deixar de obter informações sobre este solo e conhecer suas características e seu comportamento.

Para entender o solo, primeiramente é preciso classificá-los pela sua granulometria, ou seja, pelo tamanho e porcentagem das partículas que o

compõem o solo a ser estudado. Desse modo podemos dividir o solo em: Pedregulho, areia grossa, areia média, areia fina, silte e argila (SOUSA, 2015).

Com o surgimento da Mecânica dos Solos, desenvolvida na primeira metade do século XX, por um engenheiro austríaco chamado Karl Von Terzaghi, foram introduzidos diversos princípios que servem como base até os dias atuais, como o conceito e existência da tensão efetiva, tensão de sobreadensamento, compactação dos solos, entre outros. Já foi possível aprender muito sobre os solos moles com mais de oito décadas do surgimento e estudo da Mecânica dos Solos, e também foi possível consolidar diversas teorias como compressibilidade, adensamento, resistência não drenada, etc. Porém os solos argilosos ainda surpreendem projetistas e executores quando é referente à deslocamentos tanto verticais quanto horizontais e também sobre condições de estabilidade, devido a isso, um bom estudo sobre as características do solo e o seu comportamento ao longo da execução pode ser fundamental para um projeto bem sucedido (BARONI, 2016; FORMIGHERI, 2003).

Tratando-se de solos argilosos saturados, conhecidos também como solos moles, projetar uma estrutura por cima do mesmo se torna um desafio, já que solos que possuem essa característica podem continuar adensando durante anos ou décadas, pois possuem baixa resistência ao cisalhamento, pouca permeabilidade e compressibilidade alta. Para que se desenvolva o projeto e para definir o melhor método construtivo para lidar com esse tipo de solo é necessário prever corretamente como esse solo irá se comportar ao desenvolver do projeto, e também no decorrer dos anos seguintes (FILHO, 2017).

Apesar do estudo granulométrico, raramente o solo se apresentará de modo homogêneo, pelo contrário, os solos estudados, grande parte das vezes, se apresentam de forma heterogênea, ou seja, grãos de granulometrias diferentes misturados ou distribuídos em camadas, criando uma certa incerteza sobre o seu comportamento. Quando referente à fundações por estacas em solos argilosos saturados, existem diversos efeitos a serem observados, um deles ocorre quando o solo recalca mais do que a estaca, causando nela uma sobrecarga. Esse fenômeno é denominado Atrito Negativo (FILHO, 2017; VELLOSO & LOPES, 2011).

Este tema foi escolhido visando apresentar a importância do estudo do solo antecedente a execução, visto que este efeito gera forças adicionais nas estacas, ocasionando problemas grandes em um projeto, podendo até mesmo torná-lo inviável.

O desenvolvimento do presente artigo apoia-se em pesquisas bibliográficas, de caráter descritivo, sustentada por informações e dados coletados de livros, artigos científicos assim como dissertações de mestrado e teses de doutorado.

Este artigo tem como objetivo informar sobre as causas e consequências desse efeito, mencionando sua importância e periculosidade dentro de um projeto.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Princípio das Tensões Efetivas

O princípio das tensões efetivas introduzido por Terzaghi em 1923 foi de extrema importância para o entendimento comportamental dos solos. Para seu entendimento, pode-se dividir esse princípio em duas partes:

1) **Definição das Tensões Efetivas:** Para um solo que possui os seus vazios preenchidos por água, as tensões principais podem se dividir em duas partes, uma é a tensão sustentada pela água, onde o aumento da pressão age em todas as direções nas partículas do solo, comprimindo-as, esta fração da tensão total é denominada **pressão neutra** ou **poropressão** (u). Já a outra parte age diretamente nos sólidos do solo, sendo transmitida entre as partículas, passando de uma partícula para outra, essas são denominadas **tensões efetivas** (σ'). Portanto, para solos saturados, pode-se obter a tensão efetiva pela equação:

$$\sigma' = \sigma - u$$

Onde σ representa a tensão total e u representa a poropressão.

2) **Importância das Tensões Efetivas:** Todos os efeitos decorrentes da variação de tensões no solo são consequentes da alteração da tensão efetiva. Se a tensão total aumentar sem que a pressão da água sofra alteração, existirá mudança na tensão efetiva, alterando o volume do solo, ou seja, as posições dos grãos só mudam se a tensão efetiva variar.

Sendo assim, já que as partículas do solo são consideradas incompressíveis, conclui-se que nenhum efeito mecânico é decorrente da pressão neutra (BRASIL, 2015; PINTO, 2006).

Adensamento e compressibilidade dos solos

Quando aplicamos cargas em determinado solo, as tensões causadas geram uma reorganização em sua estrutura, comprimindo as camadas e reduzindo o volume do solo, isso ocorre, pois, algumas partículas se deslocam, se reorganizando e outras se quebram. Tratando-se de solos moles, a redução do volume é decorrente de sua baixa permeabilidade, uma vez aplicadas tensões neste solo, inicialmente a água presente nos vazios do solo é responsável por sustentar a carga, chamamos isso de poropressão. Então a água presente nesses vazios é expulsa ao mesmo tempo que ocorre uma compressão das partículas sólidas, esse processo continua até dissipar totalmente a poropressão, ou seja, até que a tensão em excesso da água passe a ser suportada totalmente pelas partículas sólidas, assim temos o adensamento (BERTAZO, 2018).

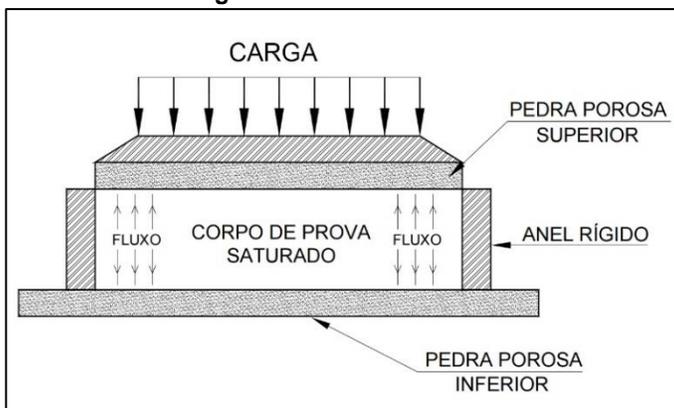
Podemos classificar os recalques causados por esse adensamento em:

- Recalque imediato: é causado por uma deformação elástica de um solo, ocorrendo logo após a colocação de uma carga, em poucos segundos, como a areia, por exemplo;
- Adensamento primário: é causado pela evasão da água e ar que ocupam os vazios do solo e ocorre de forma lenta, é comum em solos argilosos saturados e podem durar meses ou anos;
- Adensamento secundário: esse tipo de recalque ocorre devido as tensões efetivas constantes e é ocasionado pela reorganização estrutural do solo. Esse tipo de recalque ocorre após o adensamento primário, no qual as tensões efetivas se estabilizam, isso ocorre ao decorrer de décadas (MUNDIM et al, 2013).

Quando comparadas, é notável que as deformações dos solos argilosos são superiores as deformações dos materiais de construção e não ocorrem instantaneamente com a colocação das cargas e estruturas, mas sim ao longo do tempo, além do fato de que essas deformações podem ser não-uniformes, causando assim esforços extras e não calculados em determinadas estruturas (CAPUTO, 1988).

O experimento mais comum para o estudo comportamental dos solos argilosos é o ensaio edométrico, feito em laboratório e que consiste em comprimir um corpo de prova de determinado solo, simulando as estruturas que atuarão sobre este solo como mostra a figura 1. Neste ensaio, a amostra é confinada lateralmente por um anel metálico rígido, impossibilitando o solo de se deformar lateralmente, assim que as tensões são aplicadas o excedente de poropressão é dissipado, ou seja, a água que se encontra presente nos vazios do solo é expulsa, passando por pedras porosas que se localizam acima e abaixo desse corpo de prova. É realizado o ensaio aplicando cargas constantes no decorrer de 24 horas, para cada etapa é feito a leitura da altura do corpo e da sua deformação em função do tempo (AGUIAR, 2008; SILVA, 2019).

Figura 1: Ensaio edométrico



Fonte: Aguiar (2008)

A Teoria do Adensamento Unidimensional de Terzaghi e Frölich (1936)

Também conhecida como teoria clássica, essa teoria estuda a maneira que ocorre a transferência de tensões da poropressão ou pressão neutra para o esqueleto sólido do solo, conseqüentemente reduzindo seu volume em função de um espaço de tempo “t”. Para o desenvolvimento da teoria, Terzaghi se baseou em 9 hipóteses com a intenção de facilitar o desenvolvimento teórico, são elas:

1. O solo é totalmente saturado.
2. A compressão possui uma única dimensão
3. O fluxo de água é unidimensional.
4. O solo é homogêneo.

Comparado à compressibilidade do solo, as partes sólidas do solo e a água são consideradas incompressíveis.

Ainda que o solo seja formado de partículas e vazios, ele pode ser estudado como elementos infinitesimais.

7. O fluxo é governado pela Lei de Darcy.
8. No processo de adensamento, não há variação das propriedades do solo.

No decorrer do adensamento, o índice de vazios varia linearmente com o crescimento da tensão efetiva.

As hipóteses limitam o solo de diversas variações, ajudando a criar um caso hipotético teórico perfeito, como as hipóteses que restringem o solo a um caso de compressão edométrica, com fluxo unidimensional, com solo homogêneo e completamente saturado (PINTO, 2006; BRASIL, 2015).

FUNDAÇÕES PROFUNDAS

Definição

Conforme definido pela ABNT NBR 6122/2019, considera-se fundação profunda aquela que transfere a carga para o terreno através da área de sua base (resistência de ponta), através da superfície lateral (resistência de fuste) ou pelas duas simultaneamente e que está escorada em profundidade superior ao dobro de sua maior dimensão em planta, e com mínimo de 3 metros.

Segundo a versão de norma anterior (ABNT NBR 6122/1996), neste modelo de fundação podem se incluir estacas, tubulões e caixões, além de ressaltarem que não há distinção nítida entre caixões e tubulões, pois os dois permitem a descida do operário em seu interior em certas fases, enquanto as estacas se distinguem pela sua execução que é realizada somente através de ferramentas ou equipamentos sem que haja descida do operário em nenhum momento. Apesar disso, Velloso e Lopes (2011) cita uma diferença na geometria se tratando de caixões e tubulões, onde define o

tubulão como cilíndrico e o caixão como prismático.

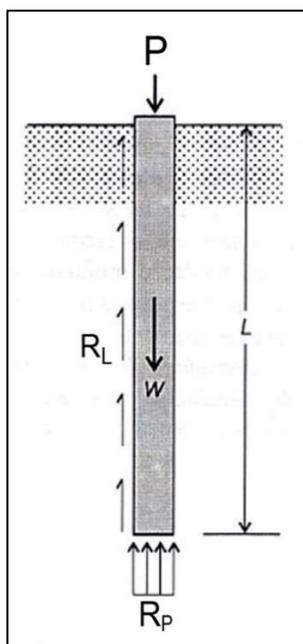
Fundações por estacas

As estacas se diferenciam mediante a diferentes critérios, como o material e execução. Quanto ao material as estacas podem ser classificadas como: madeira, concreto, aço ou mistas; já quanto ao processo executivo, podemos dividi-las pelo efeito que provocam no solo, classificando-as como:

- De deslocamento: são as estacas que ao serem inseridas deslocam o solo para que possa ocupar aquele espaço, sendo assim, não é necessário a retirada de solo do local.
- De substituição: são as estacas que promovem a remoção do solo do local em que serão introduzidas, esse processo acarreta na diminuição de tensões horizontais do solo.

Em um projeto de estacas é preciso que seja atendido uma equação de equilíbrio, onde o peso que a estaca recebe somado ao seu peso próprio seja inferior à sua resistência de ponta somada a resistência ao longo do fuste conforme demonstrado na figura 2 (FILHO, 2017).

Figura 2: Carga de compressão aplicada em uma estaca



Fonte: Filho (2017)

Sendo assim, esse equilíbrio pode ser demonstrado na seguinte equação:

$$P + W = R_P + R_L$$

Onde:

P = Capacidade de carga da estaca;

W = Peso próprio da estaca;

R_P = Resistência de ponta;

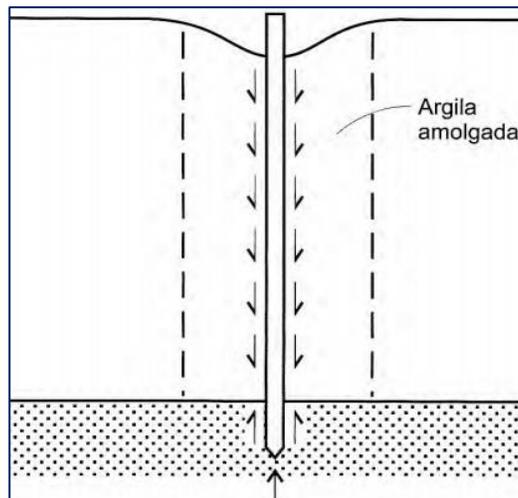
R_L = Resistência lateral;

ATRITO NEGATIVO

Conceito

O atrito lateral em fundações sobre estacas ocorre pela diferença de deslocamento entre o solo e a estaca, podendo acontecer de duas formas. Se a estaca sofrer recalques maiores que o solo temos o efeito de atrito positivo atuando no entorno da estaca, que colabora para a capacidade de carga da fundação. Porém existem casos onde o solo apresenta recalque superior ao da estaca, nesse caso, a direção do atrito atuante na extensão do fuste se inverte, passando a atuar com o direcionamento para baixo, sendo assim denominado atrito negativo. Nessas situações o solo para de contribuir com resistência da fundação se tornando um peso adicional e causando uma sobrecarga na estaca (AZEVEDO, 2017).

Figura 3: Ação do atrito negativo causado pelo amolgamento da argila em volta da estaca



Fonte: Velloso & Lopes (2011)

Velloso & Lopes (2011) destacam 5 principais casos que podem provocar o atrito negativo, são eles: (a) o amolgamento do solo, (b) Camadas de argila recentemente solicitadas, (c) rebaixamento do nível d'água, (d) cravação de estacas em solos subadensados e (e) estacas cravadas em solos colapsíveis.

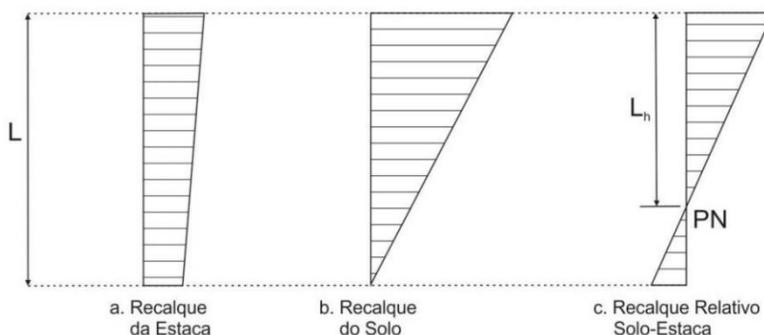
- a. Ao cravar estacas, o solo em volta do fuste sofre um amolgamento como mostrado na figura 3, esse processo reduz a resistência inicial do solo. Dessa forma quando aplicada a tensão vertical, esse solo argiloso amolgado tende a adensar mais do que a estaca.
- b. Estacas que atravessarem uma camada de solo argiloso recentemente solicitado por um aterro estão suscetíveis a atrito negativo, pois a argila mole, por encontrar-se ainda em processo de adensamento pode sofrer recalques maiores que o da estaca.
- c. Ao se promover um rebaixamento do nível d'água em solos com baixa permeabilidade, característica de solos argilosos, esse solo entra em processo de adensamento, ocasionando o atrito negativo naquele local.
- d. Estacas cravadas em argilas sub adensadas (argilas que estão adensando devido ao peso próprio) estão suscetíveis ao atrito negativo.
- e. Outro caso é o de estacas cravadas em solos colapsíveis. É denominado solo colapsível um solo não saturado, que quando umedecido pode entrar em processo de adensamento e sofrer recalques adicionais, esse efeito pode, por consequência, gerar atrito negativo na extensão do fuste da estaca.

O atrito negativo é exclusivamente um problema relacionado à recalque de fundação, em todos os casos o atrito negativo é consequência do adensamento de camadas de solos argilosos com baixa permeabilidade ao longo do tempo. Também vale ressaltar casos onde a estaca esteja assentada em rochas ou em areia muito compacta, já que esse apoio impede consideravelmente o recalque da fundação (VELLOSO & LOPES, 2011; NETO, 2004).

Ponto neutro

Conforme explicado anteriormente, o atrito se promove ao longo do fuste de uma estaca, quando o solo recalca mais que a estaca, temos o atrito negativo, quando o recalque maior é o da estaca, temos o atrito positivo. Em 1935, Terzaghi considerou a possibilidade de os dois efeitos ocorrerem simultaneamente na mesma estaca, em parte do seu comprimento superior o solo recalca mais, desenvolvendo-se o atrito negativo, porém na parte inferior dessa estaca, o solo tem um recalque menor, desenvolvendo-se o atrito positivo (Figura 4).

Figura 4: Ocorrência do Ponto Neutro



Fonte: Azevedo (2017)

Sendo assim, existe um ponto onde o recalque do solo é igual ao recalque da estaca, esse ponto foi chamado por Terzaghi de Ponto Neutro. Acima desse ponto se tem atrito negativo, e abaixo tem-se atrito positivo. Apesar da comprovação de sua existência em medições de atrito negativo ao longo dos anos, Terzaghi não considera o ponto neutro em seus cálculos.

Citado por Santos Neto (1981), Okabe (1977) diz “A intensidade do Atrito Negativo e a distância do Ponto Neutro em referência ao nível do terreno, aumenta com o aumento da rigidez da camada próxima à ponta”. Em outras palavras, quanto mais resistente o solo no qual a estaca está apoiada, menor será o recalque desta estaca, por consequência o ponto neutro ficará mais profundo e mais longe da superfície.

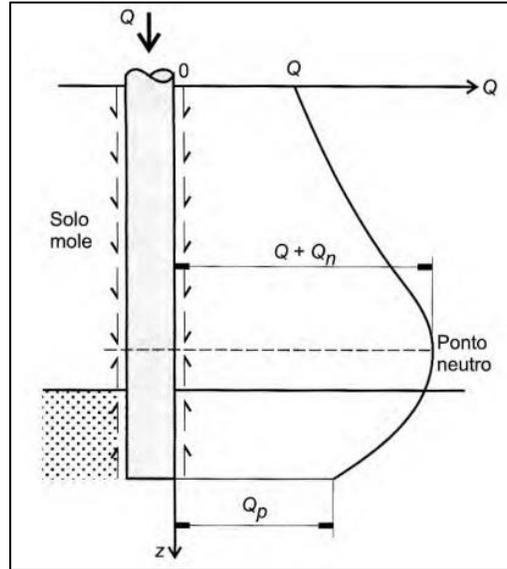
Existem divergência em sugestões de diversos autores sobre a profundidade do ponto neutro, Santos Neto (1981) cita a sugestão de Endo et al. (1969) que define que o ponto neutro está abaixo do ponto médio da estaca. Oliveira (2018) cita outros autores como Prakash e Sharma (1990) que sugerem que o ponto neutro se localiza a $0,75L$ da estaca e Leung et al (2004) que definem a profundidade como $0,9L$ da estaca por meio de estudos experimentais.

Atrito negativo como carga adicional

O principal fator do atrito negativo é a carga adicional que ele gera na estaca, quando o solo em volta da estaca recalca mais do que a própria estaca, além de deixar de contribuir com a capacidade de carga, esse solo passa também a arrastar a estaca para baixo, se tornando um peso adicional não calculado, provocando assim um esforço normal na estaca que é descarregado na altura do ponto neutro. Dessa forma, no dimensionamento de estacas suscetíveis ao atrito negativo, deve-se verificar a condição em que a carga admissível (Q_{adm}) da estaca seja maior que a soma da carga permante (Q) com a carga gerada pelo atrito negativo (Q_n) como

representado na figura 5. (VELLOSO & LOPES, 2011).

Figura 5: Atrito negativo agindo como carga adicional



Fonte: Velloso & Lopes (2011)

Essa condição pode ser representada pela seguinte fórmula:

$$Q + Q_n < Q_{adm}$$

Estimativa do atrito negativo

Velloso & Lopes (2011) definem um método simples para o cálculo do atrito negativo em condições drenadas, assumindo que o ponto neutro se encontra na base da estaca o atrito negativo pode ser calculado pela equação:

$$\tau_n = a + K\sigma'_v tg(\phi'_a)$$

Onde a representa a aderência no contato estaca-solo, σ'_v é a pressão efetiva vertical que se encontra próximo à estaca, K é o coeficiente de empuxo da terra e ϕ'_a corresponde ao ângulo de aderência estaca-solo.

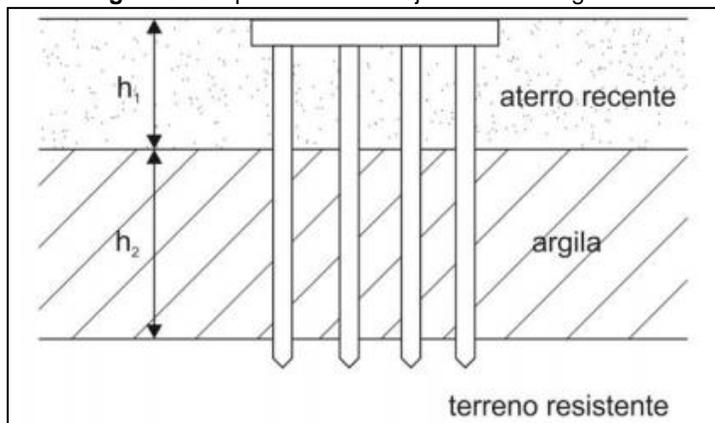
Para quantificar o atrito negativo, diversos autores apresentaram métodos de cálculos diferentes, entre eles estão: Terzaghi & Peck (1948); Johannessen & Bjerrum (1965); Zeevaert (1983); De beer & Wallays (1993); e Endo et al. (1969) entre outros diversos autores. A seguir serão apresentados resumidamente alguns desses métodos.

Método Therzaghi e Peck (1948)

Citado por Santos Neto (1981), esse método tem como propósito estimar um valor limite do atrito negativo para um grupo de estacas, como demonstrados na figura 6, porém também pode ser aplicado em estacas isoladas. Qualquer movimento do maciço de solo em volta das estacas é suficiente para que todo o peso do aterro seja aplicado nesse grupo de estacas por conta do atrito lateral estaca-solo. Nesse caso o atrito negativo poderia ser representado por:

$$AN = Q_1 + Q_2$$

Figura 6: Grupo de estacas sujeito à atrito negativo.

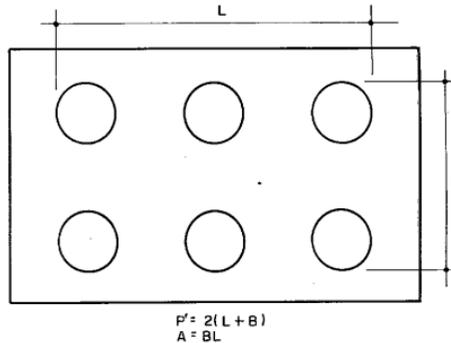


Fonte: Azevedo (2017)

A primeira parcela Q_1 representa o peso atuante do solo naquele grupo de estacas, ela é composta pela seção horizontal do grupo de estacas (A), como demonstrado na figura 7, a espessura da camada de aterro (h_1), sua massa específica (γ) e o número de estacas do grupo (n). Podemos representar essa parcela pela seguinte fórmula:

$$Q_1 = \frac{Ah_1\gamma}{n}$$

Figura 7: Área e perímetro do bloco a ser considerado



Fonte: Santos Neto (1981)

A segunda parcela Q_2 representa o adensamento que ocorre no espaço entre os grupos, é pequena quando os recalques são pequenos, porém é crescente com o passar do tempo e não pode se tornar maior do que o produto da espessura da camada de argila (h_2) pelo perímetro do grupo (P) e pela resistência média ao cisalhamento (σ_m). Sendo assim temos:

$$Q_2 = \frac{Ph_2\sigma_m}{n}$$

Johannessen e Bjerrum (1965)

Realizando testes em estacas instrumentadas sujeitas a atrito negativo, esses autores concluíram que há uma variação da aderência no contato estaca-solo na extensão do fuste. Essa variação pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\tau_a = \sigma'_h Tg \phi'_a$$

ou

$$\tau_a = \sigma'_v K Tg \phi'_a$$

Onde:

- τ_a – aderência no contato estaca-solo;
- σ'_h – Pressão efetiva horizontal;
- σ'_v – Pressão efetiva vertical;
- K – Coeficiente de empuxo da terra;
- ϕ'_a – Ângulo de aderência estaca-solo.

Caso a superfície da estaca não seja lisa, considera-se o ângulo de aderência igual ao ângulo interno efetivo do solo, ou seja, $\phi_a = \phi'$, nesse caso temos ao longo da estaca:

$$\tau_a = K \cdot t g(\phi'_a) \cdot U \int_0^Z \sigma'_v dz$$

Onde:

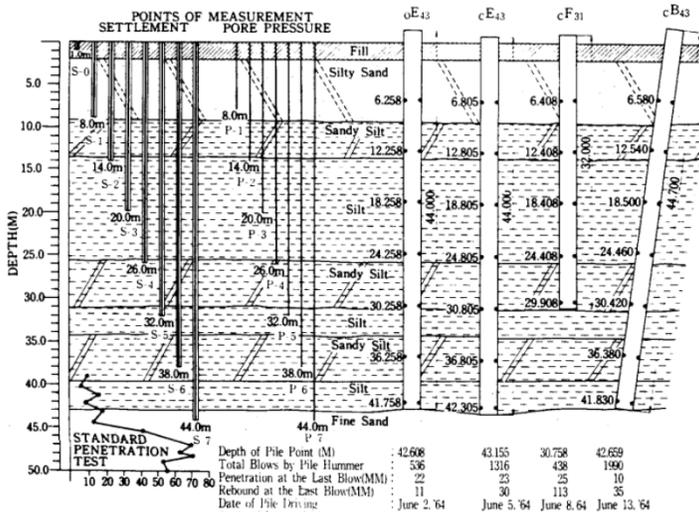
U – Perímetro da estaca

Z – Profundidade máxima da camada de argila

Método de Endo, Minou, Kawasaki e Shibata (1969)

Foi realizado um estudo no Japão sobre quatro estacas instrumentadas ao longo de 3 anos, esse estudo realizado por Endo et al., representado na figura 8, foi apresentado em 1969, no México. Os principais resultados e conclusões obtidos foram: (I) os autores conseguiram demonstrar através de experimentos que o ponto neutro se localizava entre 0,73 e 0,78 do comprimento da estaca, (II) foi possível analisar algumas diferenças entre estacas de ponta fechada e de ponta aberta, (III) O ponto neutro aparenta subir com o passar do tempo e gradualmente tende a convergir para um único ponto fixo, (IV) $K \cdot t g(\phi'_a)$ possui um valor entre 0,30 e 0,35 e (V) o método é capaz de estimar o atrito negativo máximo (REBELO, 2017).

Figura 8: Perfil geotécnico, estacas e medidores de recalque e poropressão



Fonte: Rebelo (2017)

Santos Neto (1981) acrescenta que a profundidade do ponto neutro não deve ser generalizada pois a resistência da camada em que a estaca está assente é o fator que mais tem influência sobre sua localização.

Baseado neste estudo, os autores propuseram a seguinte equação para encontrar o valor máximo do atrito negativo ($AN_{máx}$):

$$AN_{m\acute{a}x} = \eta \cdot K \cdot tg(\phi'_a) \cdot U \int_0^{\beta l} \sigma'v dz$$

Onde:

η – Coeficiente relacionado a ponta (0,6 para estacas de ponta aberta e 1 para estacas de ponta fechada);
 K – Coeficiente de empuxo lateral;
 ϕ'_a – Ângulo de atrito estaca-solo;
 U – Perímetro da estaca;
 βl – Profundidade do ponto neutro;
 $\sigma'v$ – Tensão vertical efetiva.

Na fórmula $K \cdot tg(\phi'_a)$ é substituído por α e a profundidade relativa do ponto neutro β é equivalente a $\frac{l_n}{l}$ onde l_n é a profundidade do ponto neutro e l é o comprimento da estaca. Essa proposição é idêntica à de Bjerrum & Johannessen (1965) com a diferença do coeficiente relacionado a ponta da estaca e do conceito de ponto neutro (SANTOS NETO, 1981).

Contribuição de Zeevaert e posteriormente de De Beer e Wallays

Velloso & Lopes (2011) cita Zeevaert como o autor que mais pesquisou sobre o atrito negativo e o trata como referência para aqueles que desejam se aprofundar no assunto, tendo na segunda edição de seu livro (Zeevaert, 1983) análises detalhadas sobre grupos de estacas e estacas isoladas.

Baseando-se nas ideias de Zeevaert, De Beer & Wallays (1968) publicaram um trabalho notável, que seria basicamente o método proposto por Zeevaert (1959), com o objetivo de melhorá-lo e descrito por Santos Neto (1981) como de mais fácil uso e de mais rápida aplicação.

A redução do atrito negativo

Quando se tem conhecimento da tendência à ocorrência do atrito negativo ou o mesmo atinge valores elevados, podem-se adotar medidas para reduzir tais sobrecargas, Velloso & Lopes (2011) citam alguns métodos executivos que se mostram até mesmo economicamente interessantes, como:

- Aplicação prévia de sobrecarga, induzindo que parte do recalque da camada ocorra antes da cravação da estaca, utilizando drenos verticais;
- Uso de revestimento que pode evitar o contato direto entre estaca e solo;
- Pintura da estaca utilizando produto capaz de reduzir o atrito estaca-solo.

Santos Neto (1981) cita a aplicação de uma camada betuminosa na superfície da estaca como o processo aparentemente mais eficiente, já que

foi possível reduzir o atrito negativo em até 90%, com a condição de que a camada de betume não seja danificada durante a cravação da estaca, sendo assim, pode ser necessário a execução de pré-furos nas camadas pedregulhosas e a colocação de pontas alargadas nas estacas.

Os autores Claessen & Horvat (1974) listam os requisitos para que o betume possa ser usado com eficiência como redutor do atrito negativo, sendo eles:

- A sobrecarga causada na estaca devido ao recalque do solo deve ser pequena;
- Deve ser possível aplicar a camada deslizante de maneira simples e confiável e seu custo deve ser razoavelmente baixo;
- A camada deslizante precisa se manter inalterada durante o armazenamento das estacas pintadas;
- A camada não pode ser danificada ou arrancada por consequência de choques ou de forças de cisalhamento durante a cravação.

Além disso também recomendaram que a espessura a ser usada deveria ser de 10mm de betume, pois afirmaram que espessuras menores necessitariam de proteção especial durante a cravação (SANTOS NETO, 1981; VELLOSO & LOPES, 2011).

CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentado o atrito negativo em sua natureza teórica baseado em estudos e dados coletados de autores consagrados e sua ocorrência em fundações sobre estacas devido à diferença de recalque entre estaca e solo, nesse caso, quando o solo apresenta um maior recalque em relação a estaca. Deve-se considerar o atrito negativo principalmente como problema de recalque, pois só levará ao colapso da fundação caso ocorra a ruptura da estaca. Além disso é de essencial distinguir a causa que pode provocar o atrito negativo na fundação.

Baseado na literatura especializada desenvolvida ao longo de anos, foi apresentado como o atrito negativo funciona, além de suas possíveis causas e consequências, visto que é de extrema importância considerar este fator uma vez que ele influencia diretamente nas fundações de uma construção. Também foram mostrados métodos e estudos sobre como reduzir esse efeito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 6122. **Projeto e Execução de Fundações**. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 6122. **Projeto e Execução de Fundações**. Rio de Janeiro. 1996.

AGUIAR, V. N. **Características de Adensamento da Argila do Canal do Porto de Santos na Ilha Barnabé**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2008.

AZEVEDO, R. S. **Evolução do atrito negativo no tempo: estudo de um caso de estaca metálica em argila muito compressível**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2017.

BARONI, M. **Comportamento Geotécnico de Argilas Extremamente Moles da Baixada de Jacarepaguá**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016.

BERTAZO, I. L. **Estudo do adensamento de um solo da formação Guabirotuba estabilizado com cal hidratada**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Paraná. 2018.

BRASIL, M. R. **Cálculo De Recalques Por Adensamento Unidimensional**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações: Fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro. 1988.

CLAESSEN, A. I. M.; HORVAT, E. **Reducing negative friction with bitumen slip layers**, JGED, ASCE, v. 100, n. GT8, p. 925-944, 1974.

DE BEER, E. E; WALLAYS, M.. **Quelques Problèmes que Posent les Fondations sur Pieux dans les Zones Portuaries**. La Technique des Travaux, pp. 375-384. 1983.

ENDO, M., MINOU, A., KAWASAKI, T., & SHIBATA, T. **Negative Skin Friction Acting on Steel Pipe in Clay**. 7th Inter. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., 2, pp. 85-92. México. 1969.

FILHO, A. L. **Atrito Negativo no Projeto de Fundação Profunda: Estudo de Caso**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Sergipe. 2017.

FILHO, R. G. **Obras Sobre Solos Moles E Suas Respectivas Soluções: Um Exemplo Prático Da Obra De Um Complexo De Vacinas Em Santa Cruz, Rj.** Projeto de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2017.

FORMIGHERI, L. E. **Comportamento de um aterro sobre argila mole da Baixada Fluminense.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2003.

JOHANNESSEN, I. J; BJERRUM, L. **Measurement of the compression of a steel pile to rock due to settlement of the surrounding clay.** 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Montréal. v2, pp. 261-264. 1965

LEUNG, C.F., LIAO, B.K., CHOW, Y.K., SHEN, R.F. & KOG, Y.C. **Behavior of pile subject to negative skin friction on axial load.** Soils and Foundations, v. 44, p. 17-26. 2004.

MUNDIM, D.P., CRUVINEL, E., CAVALCANTI, M. **Metodologia De Previsão De Recalques Em Sapatas De Grandes Edifícios, Através De Implementação De Uma Ferramenta Numérica, Durante Processo Construtivo.** Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Goiás. 2013.

NETO J. B. S. **Comportamento De Um Solo Colapsível Avaliado A Partir De Ensaios De Laboratório E Campo, E Previsão De Recalques Devido A Inundação (Colapso).** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2004.

OKABE, T. **Large negative friction and friction-free pile methods.** Proceedings of the Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Japan: pp. 679-682. 1977.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PRAKASH, S., & SHARMA, H. D. **Pile foundations in engineering practice.** John Wiley & Sons, New York, USA, 736 p. 1990.

REBELO, T. S. **Estudo De Caso De Uma Obra De Reforço De Fundações E Renivelamento De Edifícios.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2017.

SANTOS NETO, P. **Métodos de Cálculo de Atrito Negativo em Estacas - Estudo e Discussão**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1981.

SILVA, B. B. **Comportamento De Um Solo Residual De Gnaisse Sob Compressão Edométrica**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Catarina. 2019.

SOUSA, J. S. **Mecânica dos Solos**. NT Editora. Brasília. 2015.

TERZAGHI, K., & PECK, R. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley and Son. Nova Iorque. 1948.

VELLOSO, D. A., LOPES, F. R., 2011, **Fundações: Critérios de Projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**, São Paulo, Oficina de Textos, 2011.

ZEEVAERT, L. **Foundation Engineering: For Difficult Subsoil Conditions**. Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold Company Inc. 1983.