

PREVISÃO 3D DO EFEITO DE GRUPO E INSTALAÇÃO DE ESTACAS CRAVADAS EM AREIAS

3D PREDICTION OF INSTALLATION AND GROUP EFFECT ON DRIVEN PILES IN SAND

Conde de Freitas, Alessandra; *COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, alessandra.conde@uol.com.br*
Danziger, Bernadete Ragoni; *UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, bernadeterd@hotmail.com*
Pacheco, Marcus; *UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, marcus_pacheco@terra.com.br*
Gerscovich, Denise Maria Soares, *UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, deniseg@uerj.br*

RESUMO

Estacas cravadas em areias causam o aumento da densidade do solo e de sua resistência ao cisalhamento, reduzindo a deformabilidade. Um procedimento foi desenvolvido para a modelagem da melhoria do solo arenoso após a instalação de estacas. Análises numéricas através do program Plaxis 3D Foundation foram procedidas, considerando valores do módulo de Young inicial do solo a partir de correlações estabelecidas com o N_{60} . O artigo descreve o procedimento estabelecido para a previsão da melhoria do solo após cravação e apresenta uma aplicação a um grupo de estacas em modelo reduzido, cravadas em areia, bem documentado na literatura. A comparação dos resultados experimentais e os obtidos numericamente comprovam o potencial do programa Plaxis na reprodução do comportamento do grupo quando o modelo proposto para o melhoramento do solo é introduzido para reproduzir o efeito de instalação, incluindo o efeito de grupo.

ABSTRACT

Piles driven in sand increase soil density and soil strength, causing therefore a desired reduction in soil deformability. A procedure has been proposed in this paper to model the produced soil improvement after pile installation, along with pile-group effect. Numerical analyses by the program Plaxis 3D Foundation have been carried out adopting the initial soil Young modulus according to correlations with the normalized SPT (N_{60}) blow count. The paper describes the procedure established and its application to a small-scale model piling group in sands, well documented in the literature. The comparison of the experimental results with those numerically simulated shows the potentiality of Plaxis program to properly reproduce the piling behavior when the suggested procedure is included to model the installation and group effect.

1 - INTRODUÇÃO

A interação entre grupo de estacas é um tema bastante complexo. Quando estacas são posicionadas num pequeno espaçamento entre eixos, as tensões e deformações induzidas no maciço vizinho sofrem sobreposição e o comportamento de uma estaca individual no grupo se torna diferente do comportamento de uma estaca isolada.

A interação entre estacas num grupo costuma ser classificada em duas categorias: i) interação estaca-solo-estaca, ou seja, interação entre estacas, e ii) bloco de coroamento-solo-estaca, no caso de interação entre o bloco, o solo e as estacas. Num grupo de estacas livres, onde o bloco não tem contato com o solo, somente a interação estaca-solo-estaca é importante. Num radier estaqueado, onde o bloco tem contato direto com o solo, a interação envolve bloco-solo-estacas.

Lee e Chung (2005) ressaltam que os dois tipos de interação acima destacados podem tanto aumentar como reduzir a capacidade de carga do grupo. Dois efeitos opostos têm sido reportados na literatura: i) o efeito desfavorável que resulta em recalque adicional nas estacas ou atrito negativo causado pela sobreposição de tensões verticais e deformações no solo adjacente face à aplicação do carregamento pela estaca adjacente ou pelo bloco; esta sobreposição reduz a rigidez do solo e tende a aumentar o carregamento nas estacas externas (menos interativas) do grupo e ii) o efeito favorável onde as cargas aplicadas pelas estacas adjacentes ou pela pressão de contato entre o bloco e o solo aumenta as tensões normais no fuste das estacas, aumentando, conseqüentemente a capacidade de carga e o carregamento das estacas internas do grupo (estacas mais interativas).

Um outro fator importante no comportamento do grupo de estacas é a melhoria das propriedades do solo causada pela instalação de estacas em areias. O maior desafio na prática da engenharia de fundações é, assim, a separação entre o efeito de grupo devido à instalação das estacas e o efeito da interação sob carga.

Infelizmente não se encontra, na literatura técnica, um procedimento capaz de prever simultaneamente o efeito favorável da densificação e o efeito desfavorável da interação das estacas no grupo.

Neste artigo um procedimento inicialmente concebido para quantificar a melhoria do solo através de estacas de compactação (efeito favorável (Alves 1998; Alves e Lopes, 2001)), é utilizado para estimar a melhoria no módulo de Young do solo para modelação da interação estaca-solo-estaca com auxílio do programa Plaxis 3-D Foundation (efeito desfavorável da sobreposição do campo de tensões e deformações).

O procedimento e análise 3D foi comparado por Conde de Freitas (2010) com os resultados da pesquisa experimental de grupos de estacas em modelo reduzido apresentado por Lee e Chung (2005).

2 - EFEITO DE GRUPO

Diferentemente do caso de sapatas, em que a capacidade de carga e os recalques apresentam pequena influência dos efeitos construtivos, as fundações em estacas podem ser afetadas pelos procedimentos executivos. O grau de perturbação do solo adjacente depende da natureza do solo e processo de instalação das estacas.

Chan (2006) destaca que a análise de grupo de estacas se constitui num problema complexo de interação solo x estrutura, uma vez que o comportamento do grupo é influenciado pelo método de execução (estacas de deslocamento ou sem deslocamento), modo dominante de transferência de carga, natureza do maciço de solo, configuração tri-dimensional do grupo de estacas, presença e rigidez relativa do bloco, das estacas e do solo, entre outros efeitos.

Velloso e Lopes (2002) destacam que o efeito de grupo é estudado de forma distinta em termos de capacidade de carga e em termos de recalque. O presente artigo lida com aspectos de recalque, uma vez que está ligado ao efeito de grupo devido à instalação e à interação entre estacas carregadas.

Entre os vários enfoques propostos para a avaliação do efeito de grupo em termos de recalque pode-se destacar: i) Métodos semi-empíricos (Skempton, 1953; Vesic, 1969; Meyerhof, 1976); ii) Método do radier equivalente (Terkaghi e Peck, 1967); iii) Método da estaca equivalente (Poulos e Davis, 1980; Randolph, 1994); iv) Método dos fatores de interação (Poulos, 1968; Randolph e Wroth, 1979); v) Métodos numéricos (Butterfield e Bannerjee, 1971; Hooper e Wood, 1977; Butterfield e Douglas, 1981; Fleming et al., 1992; Cheung et al., 1988; Chow, 1989, entre outros).

Os métodos semi-empíricos são sujeitos à falta de calibração, uma vez que eles foram concebidos com base em resultados experimentais em obras locais, sem uma verificação que permita sua aplicação em outras situações, em depósitos de outra natureza. O método do radier equivalente é um procedimento simples, amplamente utilizado na prática para o cálculo dos recalques de grupos de estacas, apresentado por Terzaghi e Peck (1967). O método da estaca equivalente consiste no cálculo do recalque médio do grupo como uma estaca circular de área equivalente. O método dos fatores de interação utiliza a relação entre recalques adicionais de uma estaca pertencente ao grupo e o recalque da estaca isolada submetida a um carregamento equivalente. Os métodos numéricos têm a vantagem de fornecer uma análise detalhada do mecanismo envolvido no comportamento do grupo.

O método implementado na presente análise para considerar tanto o efeito de instalação como o efeito de grupo sob carga é um método numérico baseado no MEF (programa Plaxis Foundation 3D).

3 - EFEITO DE INSTALAÇÃO

As mudanças no maciço de solos causadas pela instalação de estacas podem afetar significativamente o comportamento do grupo. Assim, a interação entre estacas num grupo pode não ser claramente entendida por uma comparação simples do comportamento de uma estaca isolada e estacas num grupo.

No caso de solos arenosos, a melhoria do solo pela densificação é um processo bem conhecido, já que as características de resistência e deformabilidade das areias são diretamente relacionadas ao índice de vazios. Na prática o processo é aplicado principalmente para aumentar a densidade de camadas de areias superficiais, inicialmente fofas, de forma a possibilitar o uso de fundações diretas. A densificação é também aplicada para reduzir o comprimento de estacas, otimizando o custo das fundações.

Alves (1998) apresentou uma importante contribuição ao estudo de estacas de compactação em solos granulares. No artigo em apreço, a previsão do melhoramento do solo devido à cravação de estacas adjacentes num maciço de solo arenoso é procedido com base em Alves (1998). Este assunto é discutido em detalhe por Gusmão Filho (2006), que descreveu outros métodos propostos na literatura para

quantificar o melhoramento do solo e analisou diversos casos históricos na cidade de Recife, Nordeste do Brasil, onde a técnica é amplamente utilizada.

3.1 - Contribuição de Alves (1998)

Alves (1998) reuniu dados de Gusmão Filho (1995) e observou que a melhoria dos solos através de estacas de compactação poderia ser representada através da Curva Normal de Probabilidade. O uso desta curva não tem justificativa em termos da teoria de probabilidade, mas foi uma escolha feita por aquele autor na seleção de uma função matemática para estimar a melhoria do solo no entorno de estacas cravadas em areias. A escolha desta curva permite um ajuste muito bom entre a curva prevista e os resultados experimentais disponíveis em vários casos de obra documentados por Gusmão Filho (1995). A Curva Normal é representada, em duas dimensões, pela seguinte equação:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}} \quad [1]$$

onde $p(x)$ é a função densidade de probabilidade, x é uma variável aleatória, σ é o desvio padrão e m_x é o valor médio da variável x .

De acordo com Alves (1998), esta curva mostra algumas propriedades relevantes, quais sejam:

- i) A curva normal é simétrica.
- ii) A área sob a curva é numericamente igual a 1.
- iii) O desvio padrão (σ) define a forma da curva (Figura 1).

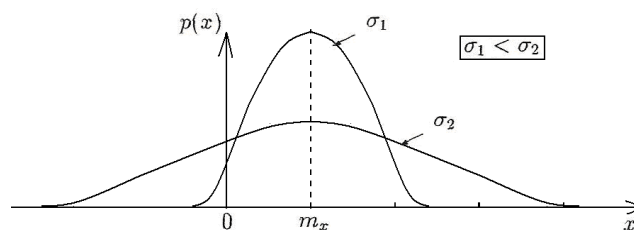


Figura 1 - Influência do valor de σ (Alves, 1998).

Alves (1998) mostra o desenvolvimento da equação da curva normal para o caso de duas variáveis randômicas. O autor analisa um elemento infinitesimal de solo na região afetada pela cravação da estaca e determina, através de expressões de índices físicos, a variação da porosidade do solo no elemento infinitesimal devido à compactação do solo no entorno da estaca. O autor, então, estima a soma das variações de porosidade de todos os elementos de solo de volume infinitesimal na região de influência da estaca cravada. O resultado desta soma deve ser igual à variação total dos vazios do solo no entorno da estaca, que deve ser igual ao próprio volume da estaca. As premissas utilizadas por Alves (1998) no desenvolvimento das equações foram as seguintes:

- i) A função densidade de probabilidade é similar à redução da porosidade do solo no entorno da estaca.
- ii) A melhoria máxima do solo (máxima densidade) ocorre no eixo da estaca.
- iii) O solo é considerado como isotrópico. A extensão da melhoria deve ser uma função única da distância ao eixo da estaca.

Com as premissas acima, Alves (1998) desenvolveu as equações que expressam a variação da porosidade do solo com a distância ao eixo da estaca. O autor inicialmente considerou as variáveis em coordenadas cartesianas. Numa segunda etapa, em razão da natureza axi-simétrica do modelo, uma transformação foi feita para variáveis cilíndricas. A equação seguinte foi obtida:

$$\Delta n = \frac{1}{8} \cdot n_o^2 \cdot e^{\left(-\frac{1}{2} \frac{r^2 \cdot n_o^2}{d^2} \right)} \quad [2]$$

Alves (1998) destaca que a equação 2 fornece a redução da porosidade do solo, Δn , causada pela cravação como uma função de três parâmetros que influenciam o aumento da densidade do solo: a distância ao eixo da estaca, r , o diâmetro da estaca, d , e a densidade inicial do solo, n_0 .

Como mostrado anteriormente na Figura 1, o desvio padrão da distribuição normal define a forma da curva. Quanto menor o desvio padrão, mais alto o pico da curva e menor a extensão da melhoria. Alves (1998) inicialmente assumiu, e depois verificou no desenvolvimento da equação 2, que Δn é função da densidade inicial do solo. Quanto mais denso o solo no seu estado inicial, menor a variação máxima da densidade (Δn_{Max}) que corresponde ao pico da curva e maior a área afetada pela cravação. Em outras palavras, quanto maior o "desvio padrão", maior a extensão da distância de influência da estaca cravada. A Figura 2 ilustra este aspecto.

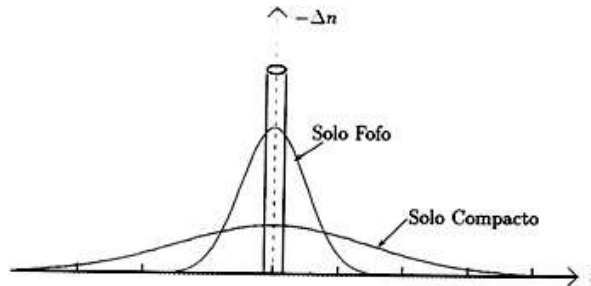


Figura 2 – Efeito da densidade inicial do solo, (Alves, 1998).

Alves (1998) também observou que no caso de um grupo de estacas os efeitos podem ser superpostos.

3.2 - Previsão do efeito de instalação

Com base na porosidade inicial do solo, n_0 , calculada a partir do índice de vazios inicial, da distância ao eixo da estaca, r , e do diâmetro da estaca, d , pode-se utilizar o princípio da sobreposição de efeitos, Alves (1998), ilustrado na Figura 3, para estimar a redução na porosidade numa dada região do estaqueamento causada pela instalação de um grupo de estacas.

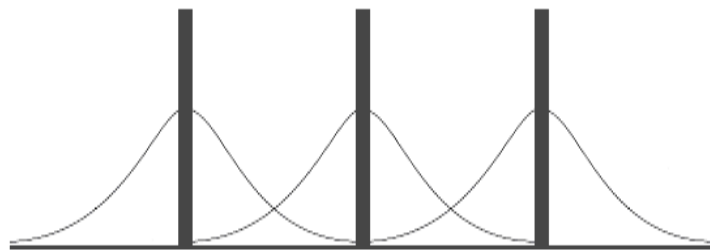


Figura 3 – Sobreposição das curvas de redução da porosidade, Conde de Freitas (2010).

A porosidade final é obtida por (equação 3)

$$n_f = n_0 - \sum_{i=1}^{n_e} \Delta n \quad [3]$$

sendo n_e o número de estacas no grupo.

A partir da porosidade final, pode-se calcular o índice de vazios final ($e_0 > e_f > e_{\text{min}}$) e a densidade relativa, indicada na equação:

$$D_r = \frac{e_{\text{max}} - e}{e_{\text{max}} - e_{\text{min}}} \quad [4]$$

A densidade relativa final permite a previsão do N_{SPT} ou N_{60} (correspondente a 60% da energia teórica do ensaio SPT) relativo ao estado de densidade relativa da Norma Internacional ou Brasileira (no Brasil, NBR 6284 da ABNT).

Com o N_{60} pode-se obter uma estimativa do módulo de Young E_s proposto por Conde de Freitas (2010) para areias:

$$E_s = 8000 N_{60}^{0.80} \quad (\text{kN/m}^2) \quad [5]$$

O efeito de instalação tri-dimensional pode ser verificado pela aplicação de uma análise por elementos finitos 3D com os parâmetros do solo melhorados introduzidos na entrada de dados do programa.

3.3 - Ensaios de Lee e Chung (2005)

Lee e Chung (2005) basearam suas análises numa série de provas de carga verticais em estacas modelo cravadas em areia. Os efeitos do grupo sob carga e os efeitos de instalação foram investigados. A influência do espaçamento entre estacas nas características da interação foram estudadas em detalhe.

Utilizando o mesmo procedimento, os ensaios de Lee e Chung (2005) são analisados neste artigo para a mesma condição do solo. A melhoria do solo concebida por Alves (1998), é considerada na modelagem do efeito de instalação. De forma similar ao procedimento dos ensaios, as análises incluem (Figura 4):

- i) Estaca isolada (série S).
- ii) Estaca central carregada isoladamente num grupo quadrado de 9 estacas sem bloco de coroamento com espaçamento relativo variando de 2 a 5 diâmetros (série S2, S3, S4 e S5).
- iii) Bloco sozinho (sem estacas).
- iv) Grupo de 9 estacas com bloco sem contato direto com o solo superficial e espaçamento entre estacas variando de 2 a 5 diâmetros (série F2, F3, F4 e F5).
- v) Grupo de 9 estacas com bloco em contato direto com o solo superficial e espaçamento relativo variando de 2 a 5 diâmetros (série P2, P3, P4 e P5).

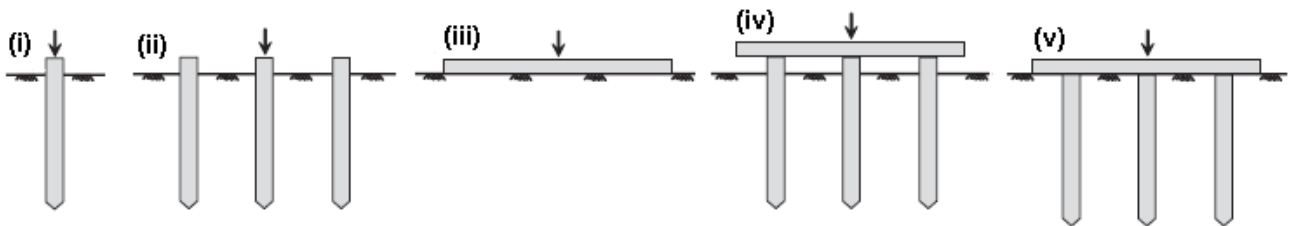


Figura 4 – Esquema dos ensaios realizados por Lee e Chung (2005).

Os números que designam cada série de testes se referem ao espaçamento entre estacas considerado em cada ensaio, por exemplo, F2, F3, P4 e P5 como ilustrado na Figura 5.

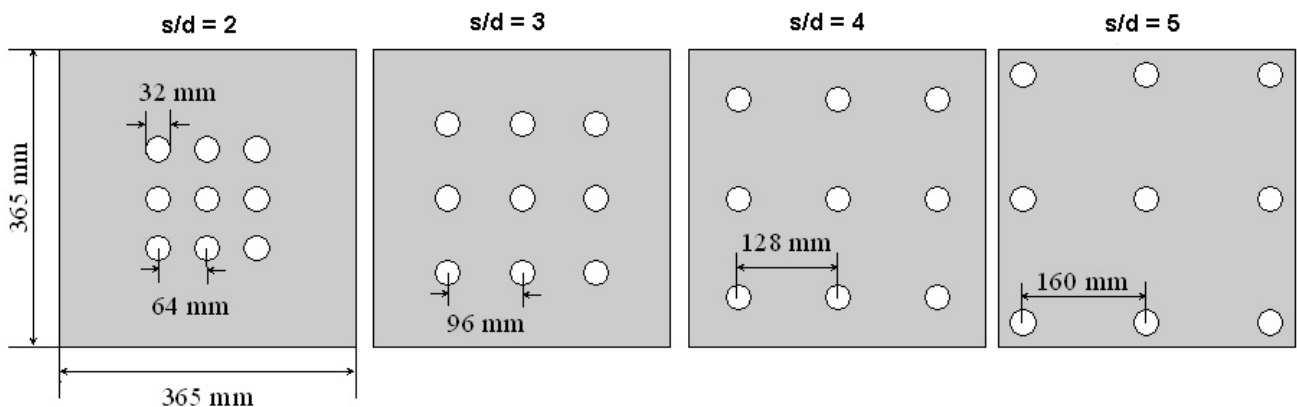


Figura 5 – Configurações do grupo (Lee e Chung, 2005).

As estacas de alumínio utilizadas por Lee e Chung (2005) foram cravadas numa caixa de 1.4m de comprimento, 1m de largura e 2.5m de profundidade, cheia de areia compactada em camadas de 0.4m com auxílio de um martelo de 50N. As estacas tinham faces lisas e polidas. As estacas apresentavam seção tubular de 32mm de diâmetro com 1.2mm de espessura de parede e comprimento total de 62mm, com 58mm de embutimento no solo nos ensaios (i), (ii) e (iv) e com 600mm de embutimento no ensaio (v), como mostra a Figura 6.

As extremidades das estacas eram cônicas, formando um ângulo de 60 graus. O módulo de Young do material das estacas é de 72.7 GPa.

Nos ensaios (iii), (iv) e (v) um bloco metálico foi utilizado, com área de 365mmx 365mm e espessura de 20mm, considerado como rígido por Lee e Chung (2005).

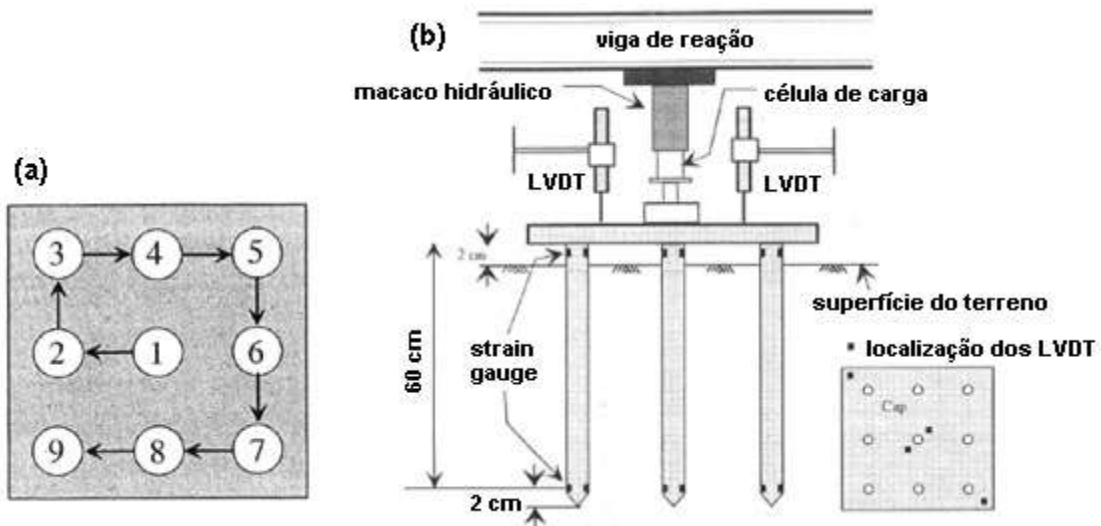


Figura 6 – Sequência de cravação das estacas (a) e sistema de aplicação de carga e medição de deformações nas estacas (b), adaptado de Lee e Chung (2005).

Em todos os ensaios procedidos a sequência de cravação ilustrada na Figura 6 (a) foi seguida. Devido à dificuldade de seleção de um critério único para determinação da capacidade de carga para cada ensaio realizado, Lee e Chung (2005) estabeleceram, como critério de análise, as medidas de carregamento para dois níveis de recalque: 0.5 mm e 3 mm. O sistema de aplicação de cargas e medidas de deformação são ilustrados na Figura 6 (b). No presente artigo as análises foram desenvolvidas até um nível de recalque de 0.5mm. As cargas obtidas pela previsão realizada por Alves (1998), proposta no presente artigo, são comparadas àquelas obtidas experimentalmente.

Cabe destacar que Lee e Chung (2005) enfatizam em seu artigo que o objetivo dos ensaios realizados visava apenas uma proposta qualitativa de estimativa do efeito de grupo, face à dificuldade de extrapolação de resultados em modelo para a escala natural. Esta observação destaca a dificuldade de reproduzir no laboratório as diferenças entre os níveis de tensão que atuam no modelo e aqueles presentes nas fundações reais.

3.4 - Procedimento proposto na modelagem do efeito de execução

Com base nos resultados dos enaios de caracterização e cisalhamento direto do solo arenoso utilizado por Lee e Chung (2005), resumidos no Quadro 1, o peso específico seco so solo γ_d foi estimado com base na equação 6 abaixo, obtendo-se 15.6 kN/m³.

$$D_r = \left(\frac{\gamma_d - \gamma_{dmin}}{\gamma_{dmax} - \gamma_{dmin}} \right) \cdot \left(\frac{\gamma_{dm\acute{a}x}}{\gamma_d} \right) \quad [6]$$

Quadro 1- Parâmetros do solo (Lee e Chung, 2005).

| | | |
|--|------|-------------------|
| Densidade dos grãos (G) | 2.66 | - |
| Peso específico seco mínimo (γ_{dmin}) | 13.1 | kN/m ³ |
| Peso específico seco máximo (γ_{dmax}) | 16.9 | kN/m ³ |
| Ângulo de atrito interno de pico (ϕ'_{pico}) | 35 | o |
| Ângulo de atrito interno a volume constante (ϕ'_{cv}) | 32 | o |
| Densidade/Compacidade relativa média do solo (D_r) | 70 | % |

Das equações 7 e 8, o índice de vazios inicial ($e_0 = 0.71$) e porosidade inicial ($n_0 = 0.42$) foram estimados. Os valores iniciais correspondem à situação encontrada antes da instalação das estacas modelo. O peso específico da água (γ_w) foi considerado como 10 kN/m³. A porosidade do solo ao final da cravação foi estimado pela equação 3 para os diversos espaçamentos relativos, com base no procedimento detalhado no no item precedente.

$$e_0 = \frac{G \cdot \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad [7]$$

$$n_0 = \frac{e_0}{(1 + e_0)} \quad [8]$$

Assim, pode-se obter o índice de vazios final, equação 9, correspondente à porosidade após a cravação das estacas, e_f , anterior ao carregamento ($e_0 \geq e_f \geq e_{min}$).

$$e_f = \frac{n_f}{(1 - n_f)} \quad [9]$$

Para esta situação, determinou-se a nova compacidade relativa, conforme expressão 4, que utiliza o índice de vazios mínimo ($e_{min}=0,57$) e o índice de vazios máximo ($e_{max}=1,03$), estimados através das equações 10 e 11, em função dos pesos específicos secos mínimo e máximo determinados por Lee e Chung (2005) para a areia em estudo.

$$\gamma_{dmax} = \frac{G \cdot \gamma_w}{1 + e_{min}} \quad [10]$$

$$\gamma_{dmin} = \frac{G \cdot \gamma_w}{1 + e_{max}} \quad [11]$$

3.4.1 - Determinação das sub-áreas

Para a determinação das regiões em que se calcularam as porosidades após a instalação das estacas, seguiu-se o seguinte procedimento: em torno de cada estaca instalada definiu-se uma região quadrangular de lado igual a duas vezes o diâmetro da estaca (0,064 m), conforme a Figura 7. A região quadrangular externa possui lados idênticos às dimensões da placa utilizada nos ensaios (0,365 m de lado). Cabe ressaltar que nas figuras que se seguem, o símbolo que representa cada uma das estacas não possui dimensões compatíveis com o diâmetro das mesmas, sendo apenas um recurso gráfico do Plaxis 3D Foundation para representá-las. Os demais detalhes nas figuras respeitam a escala adotada.

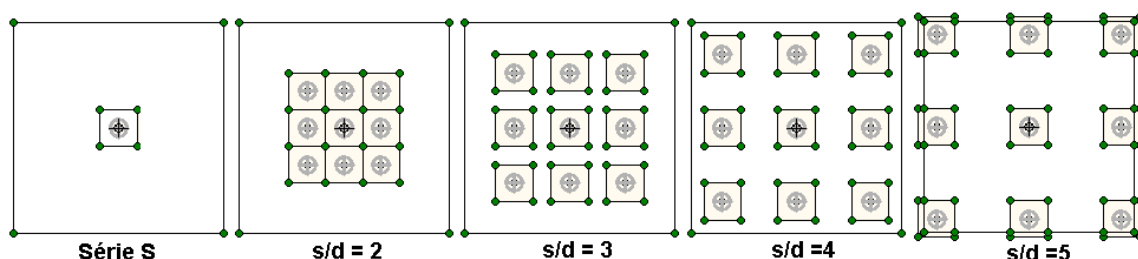


Figura 7 - Definição inicial das sub-áreas (Conde de Freitas, 2010).

A fim de melhor representar o comportamento do solo após a instalação das estacas, a partir das áreas geradas anteriormente, foram definidas novas subáreas, Figura 8.

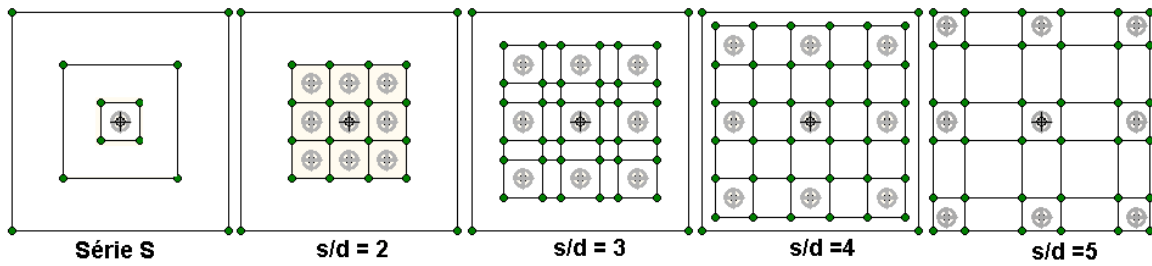


Figura 8 – Configurações finais – subáreas consideradas nas análises (Conde de Freitas, 2010).

No caso da série S, em que uma estaca isolada é carregada, definiu-se em torno da mesma uma segunda região quadrangular de lado igual a seis vezes o diâmetro da estaca (0,192 m).

Para os ensaios com espaçamento entre estacas igual a $2d$, manteve-se o layout inicial da Figura 7. Para os ensaios com espaçamento entre estacas de $3d$, $4d$ e $5d$, foram definidas regiões internas (Figura 8).

Para $s=5d$, desprezou-se a região fora dos limites que representam as dimensões da placa, pois devido à proximidade entre pontos gerados, a mesma representou um fator complicador no processo de geração de malha de elementos finitos. Assim, chegou-se às configurações finais da Figura 8 para a determinação da porosidade e demais parâmetros após instalação das estacas.

Para as simulações dos ensaios com espaçamento entre estacas de $s = 4d$ e $s = 5d$, uma região fora dos limites da placa foi também considerada nas análises, pois nestes casos as estacas encontravam-se mais afastadas do centro e mais próximas da região limítrofe. Assim, a região externa foi sensível ao efeito de instalação, Figura 9. As dimensões destas regiões externas afetadas pela instalação das estacas apresentam 0,72 m de lado para $s=4d$ e 0,78 m de lado para $s= 5d$, visto que para as estacas ensaiadas por Lee e Chung (2005) o raio de influência da melhoria, ou seja, a distância a partir da qual não há variação da porosidade, conforme equação 3 sugerida por Alves (1998), é de aproximadamente 0,23 m.

Para o espaçamento $s=4d$ o índice de vazios nesta região externa reduziu de 0,71 para 0,69 e para $s= 5d$ reduziu para 0,70. Para os demais casos, a variação do índice de vazios foi insignificante e, portanto desprezada.

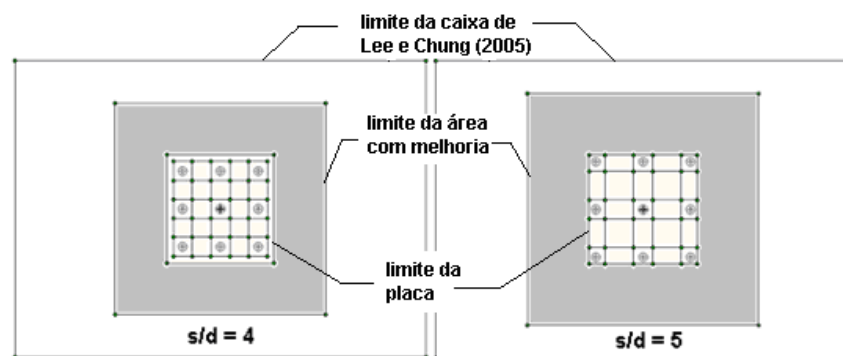


Figura 9 – Configuração da região externa afetada para os espaçamentos de 4 e 5d (Conde de Freitas, 2010).

3.4.2 - Redução da porosidade após instalação das estacas

Para cada subárea das configurações finais obtidas, Figuras 8 e 9, foram calculadas as respectivas reduções da porosidade devido ao efeito de instalação de cada uma das estacas.

A Figura 10 ilustra, para o espaçamento $s = 5d$, as distâncias r (a partir do eixo de cada estaca de diâmetro d) consideradas para o cálculo da redução Δn da porosidade através da equação 2. Na Figura 10 (a) para a subárea central, na 10 (b) para a subárea lateral, na 10 (c) para a subárea de canto, na

10 (d), (e) e (f) para as subáreas internas. Observa-se que devido à simetria do estaqueamento, a redução Δn da porosidade nas demais subáreas é idêntica às indicadas, conforme suas posições.

Para contemplar o efeito de instalação da própria estaca na subárea em que está posicionada, nos casos das Figuras 10 (a), (b) e (c), adotou-se o valor de r igual à metade do diâmetro da estaca. Nas Figuras 10 (g) e (h) foram representados os pontos, para a subárea externa (que ocorre apenas para $s=4d$ e $s=5d$), através dos quais se determinou a redução Δn da porosidade na região considerada. Realizou-se procedimento equivalente para os demais espaçamentos e para a série S, em que uma estaca é testada isoladamente.

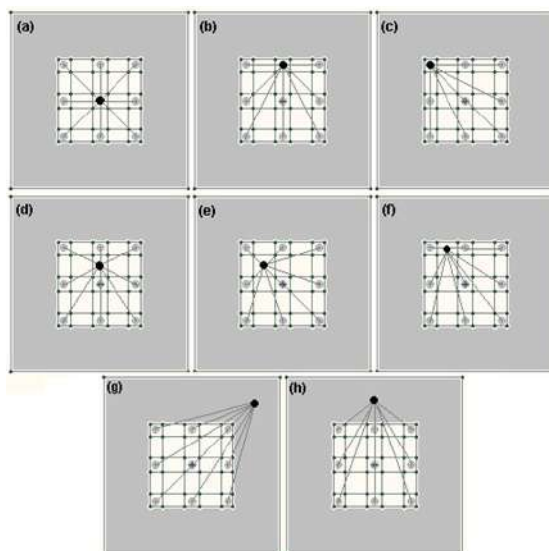


Figura 10 – Representação das distâncias (r) utilizadas para o cálculo dos Δn para $s/d = 5$ (Conde de Freitas, 2010).

3.4.3 - Influência do efeito de execução nos parâmetros do solo

Os valores dos ângulos de atrito e de N_{60} considerados nas análises foram interpolados a partir dos valores relacionados no Quadro 2.

Quadro 2- Limites propostos para N_{60} e para o ângulo de atrito em função da densidade relativa.

| | D_r (%) | N_{60} | ϕ' |
|---|-----------|----------|---------|
| Para o solo original | 70 | 26 | 35° |
| Limite máximo sugerido para os solos melhorados | 100 | 55 | 40° |

Os valores sugeridos para N_{60} foram baseados nos valores de N_{SPT} para a Norma Brasileira, NBR 6484 (2001), convertidos para a energia teórica, em função da densidade relativa.

Quanto aos ângulos de atrito do Quadro 2, Souza Pinto (2000) considera os limites de 35° a 43° para areias mal graduadas com grãos angulares. Como a areia utilizada nos ensaios foi classificada como SP, pelo SUC, (SP, poorly graded), mas de grãos arredondados, utilizou-se os limites de 35° a 40°.

A partir da porosidade ao final da instalação das estacas determina-se o índice de vazios e , com base na equação 4, a nova densidade relativa. A partir da densidade relativa, interpolando-se na faixa de valores da NBR 6484 (2001) obtém-se o N_{SPT} (e , portanto o N_{60} , após correção da energia) que é utilizado nas correlações estabelecidas para a determinação do módulo de elasticidade.

Determinou-se também o peso específico seco, submerso e saturado do material, após instalação das estacas, a partir da porosidade ao final da instalação das estacas, conforme as expressões a seguir.

$$\gamma_d = G \cdot (1 - n_f) \cdot \gamma_w \quad [12]$$

$$\gamma_{sub} = \frac{G - 1}{1 + e_f} \cdot \gamma_w \quad [13]$$

$$\gamma_{sat} = \gamma_{sub} + \gamma_w \quad [14]$$

3.4.4 - Parâmetros estimados após instalação

Os parâmetros melhorados do solo obtidos do procedimento detalhado anteriormente são resumidos no Quadro 3 para os diversos ensaios realizados por Lee e Chung, 2005.

O ângulo de dilatância (ψ) foi estimado, conforme Brinkgreve et al. (2007), para os casos em que $\phi' > 30^\circ$, a partir da equação 15.

$$\psi = \phi' - 30^\circ \quad [15]$$

Para todos os solos utilizados nas análises, considerou-se: $R_{inter} = 0,75$, coesão de 0,2 kPa e coeficiente de Poisson de 0,3 e adotou-se também, para todas as análises, o Modelo Mohr-Coulomb e o material com comportamento drenado.

As designações utilizadas para os solos no Quadro 3 referem-se às configurações ilustradas na Figura 11 além, obviamente do solo original, ou seja, o solo sem melhoria não representado nesta figura. Algumas das sub-áreas indicadas na Figura 8 não aparecem na Figura 11, uma vez que foram obtidos valores de porosidade final muito próximos, o que motivou a incorporação de algumas regiões, simplificando a geometria final.

Conde de Freitas (2010) apresentou, de forma detalhada, as estimativas da redução da porosidade para os diferentes valores de s/d , para a determinação do índice de vazios e demais parâmetros indicados no Quadro 3.

O módulo de Young foi obtido com base na equação 5. As variações encontradas em cada subárea foram compatíveis com o modelo de Alves (1998).

Quadro 3- Parâmetros obtidos para os solos.

| Características dos solos | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------|--------------|-----------|----------|-----------------------------|----------------|---------------|
| Análise | Solo | Y_d (kN/m ³) | Y_{sat} (kN/m ³) | e_f | D_r (%) | N_{SPT} | N_{60} | E (kN/m ²) | ϕ' (o) | ψ (o) |
| todas | $S_{original}$ | 15,60 | 19,70 | 0,710 | 70 | 19 | 26,00 | 47470 | 35 | 5,0 |
| Série S | S_a | 16,12 | 20,06 | 0,650 | 83 | 24 | 32,56 | 56881 | 37,2 | 7,2 |
| | S_b | 15,96 | 19,96 | 0,667 | 79 | 22 | 30,55 | 54252 | 36,5 | 6,5 |
| | S_c | 15,69 | 19,79 | 0,695 | 73 | 20 | 27,54 | 50221 | 35,5 | 5,5 |
| $s/d = 2$ | $S_{int\ 2d}$ | 16,94 | 20,57 | 0,570 | 100 | 30 | 41,00 | 67003 | 40 | 10,0 |
| | $S_{ext\ 2d}$ | 16,34 | 20,20 | 0,628 | 87,4 | 25 | 35,00 | 59468 | 38 | 8,0 |
| $s/d = 3$ | $S_{int\ 3d}$ | 16,94 | 20,57 | 0,570 | 100 | 30 | 41,00 | 67003 | 40 | 10,0 |
| | $S_{ext\ 3d}$ | 16,23 | 20,13 | 0,638 | 85 | 25 | 34,25 | 58180 | 37,5 | 3,8 |
| $s/d = 4$ | $S_{int\ 4d}$ | 16,81 | 20,49 | 0,582 | 97 | 29 | 39,59 | 65769 | 39,5 | 9,5 |
| | $S_{lateral\ 4d}$ | 16,57 | 20,34 | 0,605 | 92 | 27 | 36,99 | 62016 | 38,7 | 8,7 |
| | $S_{canto\ 4d}$ | 16,41 | 20,24 | 0,621 | 89 | 26 | 35,57 | 60747 | 38,2 | 8,2 |
| | $S_{ext\ 4d}$ | 16,27 | 20,16 | 0,635 | 86 | 25 | 34,00 | 58180 | 37,7 | 7,7 |
| | $S_{fora\ placa\ 4d}$ | 15,72 | 19,81 | 0,692 | 73 | 20 | 26,88 | 48852 | 35,3 | 5,3 |
| $s/d = 5$ | $S_{int\ 5d}$ | 16,44 | 20,26 | 0,618 | 90 | 26 | 36,00 | 60747 | 38,3 | 8,3 |
| | $S_{lateral\ 5d}$ | 16,36 | 20,21 | 0,626 | 88 | 26 | 35,00 | 59468 | 38 | 8,0 |
| | $S_{canto\ 5d}$ | 16,29 | 20,17 | 0,633 | 86 | 25 | 34,00 | 58180 | 37,7 | 7,7 |
| | $S_{fora\ placa\ 5d}$ | 15,73 | 19,82 | 0,699 | 73 | 20 | 28,00 | 50221 | 35,7 | 5,7 |

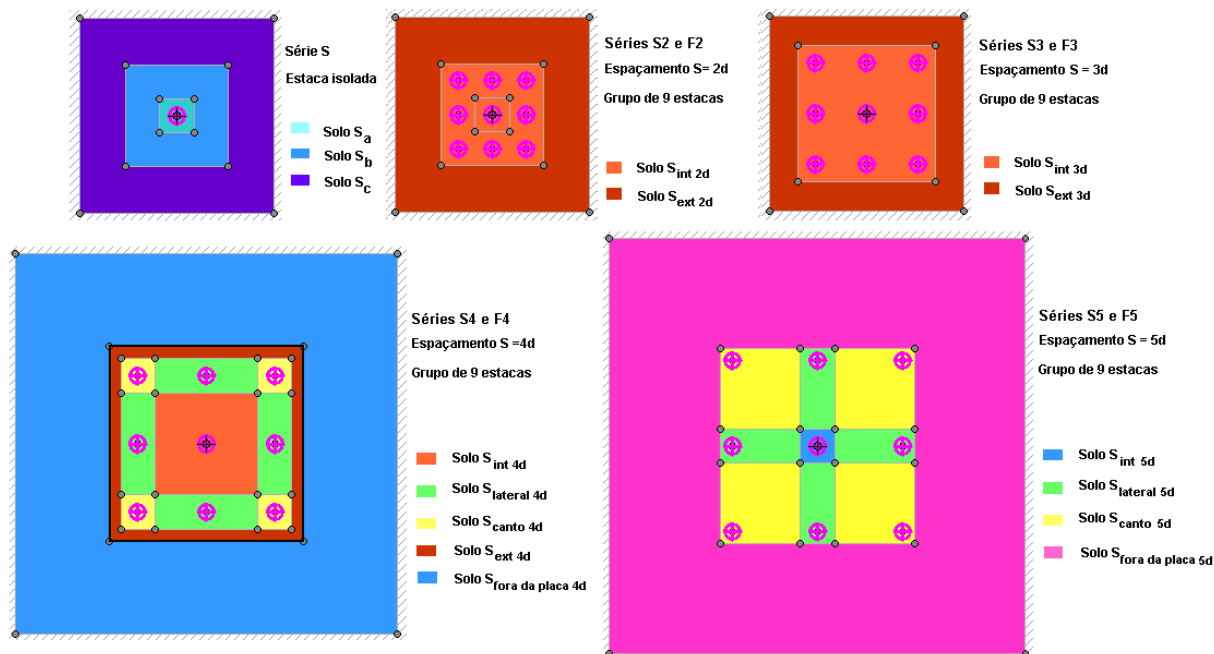


Figura 11 – Representação dos solos utilizados nas análises (Conde de Freitas, 2010).

3.4.5 - Parâmetros estimados após instalação

As estacas de ponta fechada utilizadas por Lee e Chung (2005) foram modeladas como estacas maciças com peso específico equivalente, com características resumidas no Quadro 4, com peso específico do alumínio de 26 kN/m³.

O atrito lateral disponível na interface solo x estaca foi estimado pelo método do Corpo de Engenheiros do Exército Americano, US Army Corps (2005) para estacas metálicas em solo de comportamento drenado. A resistência de ponta foi estimada com base na resistência total mobilizada reduzida do atrito lateral estimado. O Quadro 5 reúne os resultados considerados dos parâmetros de resistência utilizados como entrada no programa Plaxis 3D. Detalhes dos resultados estão documentados em Conde de Freitas, 2010.

Quadro 4 – Parâmetros das estacas para análise por FEM Plaxis 3D (testes de Lee e Chung, 2005).

| Tipo | - | Embedded pile | - |
|-----------------------------|----------------|---------------------|-------------------|
| Módulo de Young equivalente | E_{eq} | 1.096×10^7 | kN/m ² |
| Peso específico equivalente | γ_{equ} | 3.75 | kN/m ³ |
| Tipo de estaca | - | Circular maciça | - |
| Diâmetro da estaca | D | 0.032 | m |

No Quadro 5 a identificação das estacas correspondem, para cada série, à sua posição no grupo. $E_{original}$ é o módulo de Young antes de qualquer melhoria, E_a é o módulo de Young após a cravação de uma única estaca, Série S, com melhoria. A designação de cada uma das estacas é indicada na Figura 12.

Ao contrário do que é normalmente utilizado no MEF, a capacidade de carga de uma estaca do tipo "embedded pile" é um valor a ser suprido nas análises, ao invés de um resultado do cálculo pelo MEF. De acordo com Brinkgreve et al. (2007), o usuário deve considerar a importância dos valores adotados nas análises que devem, preferencialmente, ser baseados em resultados representativos de provas de carga.

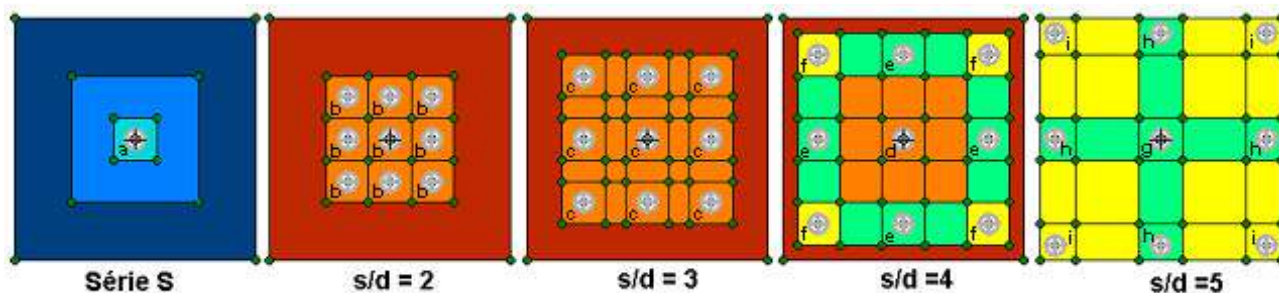


Figura 12 – Designações das estacas modeladas (Conde de Freitas, 2010).

Quadro 5 – Parâmetros das estacas para análise por FEM, programa Plaxis 3D, Testes de Lee e Chung (2005).

| Análise | Estacas e módulo de Young | δ (o) | σ'_v (kN/m ²) | f_s (kN/m ²) | $T_{bot Max}$ (kN/m) | P_L (N) | F_{max} (N) | F_{max} US Corps (N) | P_{rupt} US Corps (N) |
|---------|---------------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------|-----------|---------------|------------------------|-------------------------|
| Serie S | (a) $E_{original}$ | 23.45 | 9.36 | 4.06 | 0.41 | 122.45 | 1169 | 436.60 | 559.06 |
| | (a) E_a | 24.92 | 9.67 | 4.50 | 0.45 | 135.55 | 1155 | 715.64 | 851.19 |
| s/d =2 | (b) $E_{int 2d}$ | 26.80 | 10.16 | 5.13 | 0.52 | 154.84 | 1136 | 956.40 | 1111.25 |
| s/d =3 | (c) $E_{int 3d}$ | 26.80 | 10.16 | 5.13 | 0.52 | 154.84 | 1136 | 956.40 | 1111.25 |
| s/d =4 | (d) $E_{int 4d}$ | 26.47 | 10.09 | 5.02 | 0.50 | 151.43 | 1140 | 908.51 | 1059.94 |
| | (e) $E_{lateral 4d}$ | 25.93 | 9.94 | 4.83 | 0.49 | 145.78 | 1145 | 847.56 | 993.34 |
| | (f) $E_{border 4d}$ | 25.59 | 9.85 | 4,72 | 0.47 | 142.24 | 1149 | 823.54 | 965.77 |
| s/d =5 | (g) $E_{int 5d}$ | 25.66 | 9.86 | 4.74 | 0.48 | 142.92 | 1148 | 793.31 | 936.24 |
| | (h) $E_{lateral 5d}$ | 25.46 | 9.82 | 4.67 | 0.47 | 140.95 | 1150 | 773.66 | 914.62 |
| | (i) $E_{border 5d}$ | 25.26 | 9.77 | 4.61 | 0.46 | 139,08 | 1152 | 762.49 | 901.57 |

4 - A ANÁLISE NUMÉRICA

4.1 - Determinação da malha de elementos finitos

A Figura 13 mostra a malha gerada para a série S, com a estaca isolada. Na Figura 14 a série S_i corresponde a situação em que a estaca central de um grupo de 9 estacas é carregada, sem bloco de coroamento, para diferentes espaçamentos relativos. A Figura 15 ilustra a malha gerada com o bloco, serie F_i, para diferentes espaçamentos relativos. A Figura 16 mostra a malha tridimensional gerada para a série F4. Para representar os demais ensaios, o refinamento da malha na direção vertical é similar ao mostrado, não sendo necessária sua ilustração.

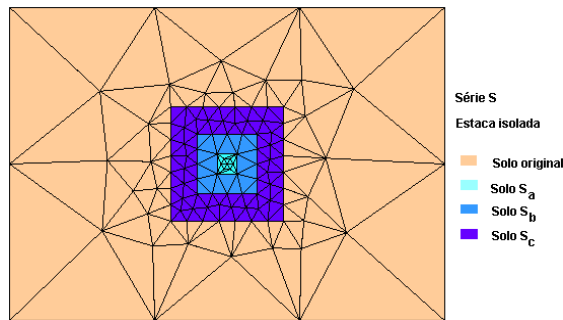


Figura 13 – Malha de elementos finitos, Serie S, Conde de Freitas (2010).

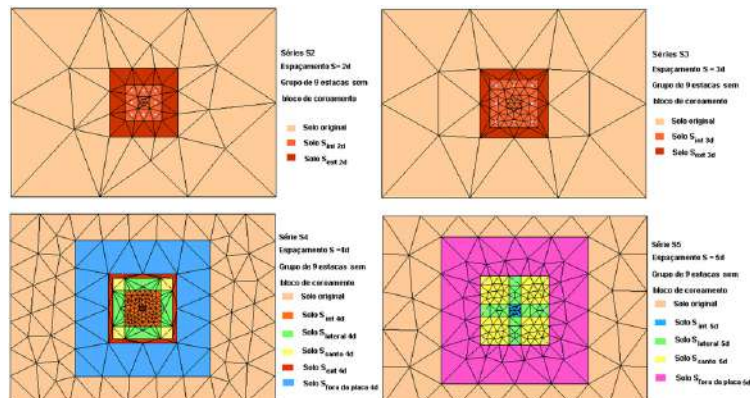


Figura 14 – Malha de elementos finitos, Serie S_i, (Conde de Freitas, 2010).

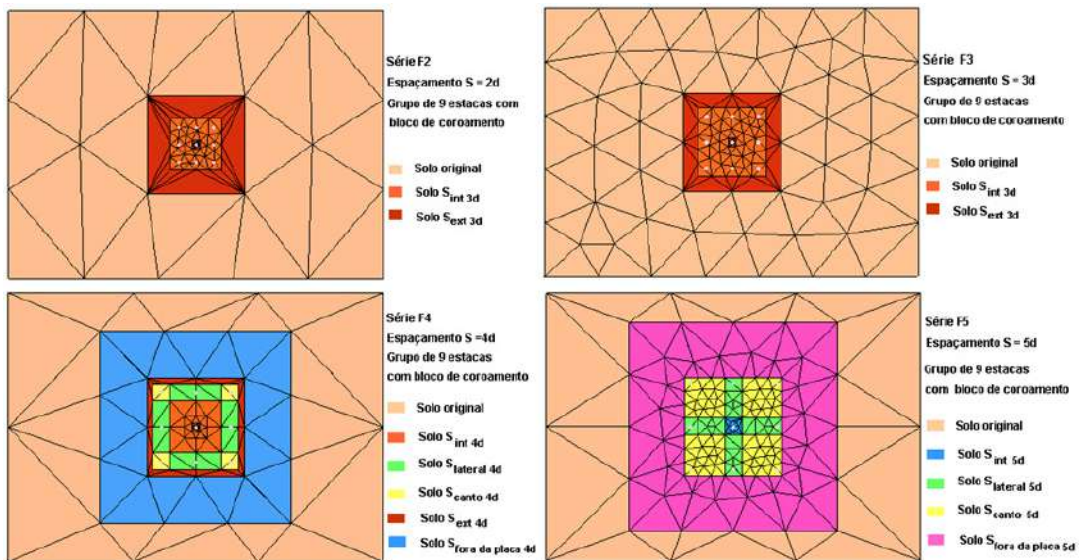


Figura 15 – Malha de elementos finitos, Serie F_i (Conde de Freitas, 2010).

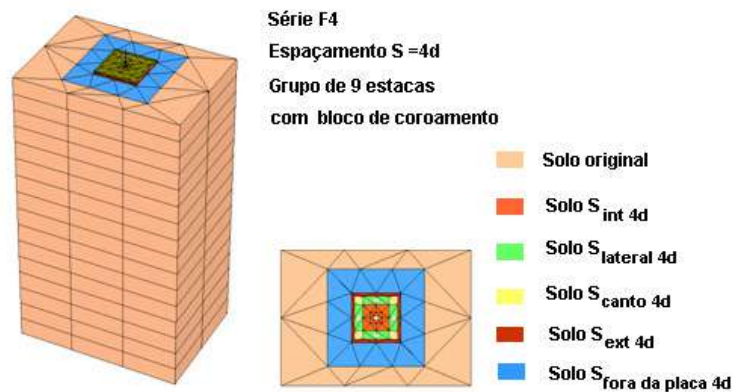


Figura 16 – Malha de elementos finitos, Serie F₄ (Conde de Freitas, 2010).

4.2 - Resultados

4.2.1 - Resultados para a série S

Para a série S, em que a estaca é carregada isoladamente, foram realizadas duas análises para o carregamento de 383 N. Na primeira foi verificado o recalque para a condição original do solo e na segunda após o efeito da melhoria devido à instalação da estaca.

Para a simulação da Série S com solo sem melhoria, o recalque obtido foi de 0,61 mm. Para a simulação contemplando a melhoria, o que corresponde à realidade, o recalque encontrado na análise foi de 0,51 mm, equivalente ao valor de 0,5 mm obtido experimentalmente.

Quanto ao mecanismo de transferência de carga observado na análise numérica, uma parcela maior da carga total foi resistida por atrito e, conseqüentemente, uma parcela menor foi resistida pela ponta, comparados aos valores experimentais, conforme Figura 17.

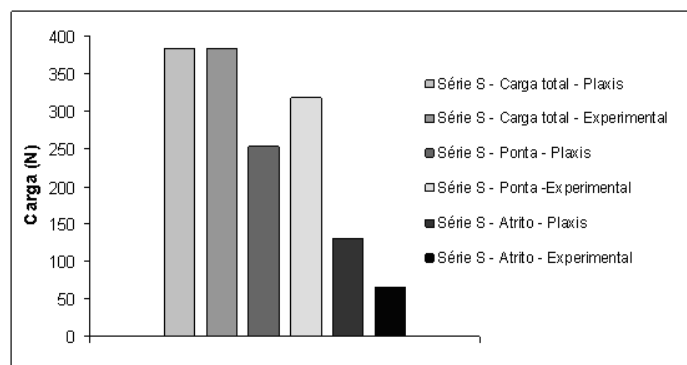


Figura 17 – Resultados da Série S (Conde de Freitas, 2010).

4.2.2 - Resultados para a serie S_i

Para os ensaios da Série S_i em que a estaca central, do grupo de nove estacas instaladas, é carregada, foram efetuados ajustes dos carregamentos nas análises numéricas, até que os recalques obtidos chegassem ao nível de recalque fixado experimentalmente (0,5 mm).

Os resultados ajustados são comparados aos experimentais no Quadro 6. Os resultados obtidos com relação às parcelas resistidas pela ponta e atrito, além da resistência total para cada relação s/d são apresentados na Figura 18.

Quadro 6 – Cargas aplicadas à estaca central – Série S_i .

| Análises | Cargas aplicadas para o nível de recalque de 0,5 mm (em Newton) | |
|----------|---|----------------------|
| | Experimental | Plaxis 3D Foundation |
| Série S2 | 464 | 440 |
| Série S3 | 512 | 480 |
| Série S4 | 410 | 400 |
| Série S5 | 418 | 420 |

Cabe observar que em todas as análises foram implementadas as melhorias dos parâmetros do solo calculadas para as configurações em planta ilustradas na Figura 11.

Observa-se, na Figura 18, o mesmo padrão de variação da resistência total com o espaçamento relativo, s/d. Resultados muito próximos foram obtidos com a utilização do Plaxis 3D Foundation, contemplando o procedimento de melhoria proposto neste artigo com base em Alves (1998), quando comparados aos obtidos experimentalmente. A mesma tendência de aumento da carga, para o deslocamento de 0,5 mm, ou seja, uma maior rigidez total foi observada para o espaçamento relativo s/d igual a 3, tanto na simulação numérica como na instrumentação.

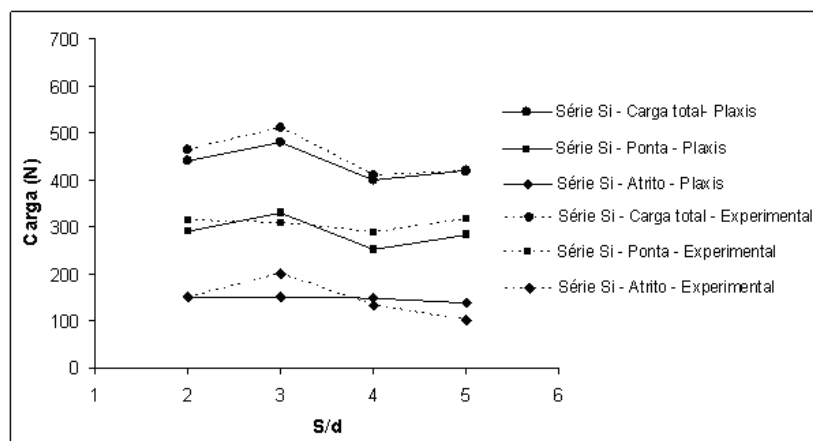


Figura 18 – Resultados obtidos para a Série S_i (Conde de Freitas, 2010).

O aspecto da curva da Figura 18, em termos de resistência total, sugere indicar, de acordo com Conde de Freitas (2010), que para a densidade original da areia, de cerca de 70%, o efeito de instalação é mais pronunciado para s/d igual a 3. Para menores espaçamentos, as estacas são tão próximas que a parcela de deslocamento a volume constante é relevante em relação à densificação real. À medida que o espaçamento aumenta, além do valor s/d de 3, a tendência é o efeito de densificação se reduzir.

De fato, para os espaçamentos relativos de 2 e 3, o índice de vazios final calculado (e_f), através da sobreposição, chegou a valores inferiores ao índice de vazios mínimo (e_{min}). Como se limitou o índice de vazios final calculado ao e_{min} , Conde de Freitas (2010) atribui a maior diferença entre o e_{min} e o e_f calculado a uma maior parcela de deslocamento a volume constante. Observou-se na estimativa da melhoria uma maior diferença entre o e_{min} e o e_f para o espaçamento relativo de 2. Para o espaçamento relativo de 3 a mesma ocorrência foi observada, porém de forma menos acentuada. Já para os espaçamentos relativos de 4 e 5 este aspecto não foi observado.

Na Figura 19 é apresentada a variação da porosidade (Δn) em função da distância ao eixo de uma estaca isolada conforme Alves (1998) para solo de compactidade compacta (70%) e fofa (25%). Para ambos os casos considerou-se o índice de vazios mínimo ($e_{min}=0,57$) e o índice de vazios máximo ($e_{max}=1,03$), já estimados no item 3.4, em função dos pesos específicos secos mínimo e máximo determinados por Lee e Chung (2005) para a areia em estudo. Assim, conforme o Quadro 7, para cada compactidade relativa (70% e 25%) obteve-se o índice de vazios inicial a partir da expressão (4) e a partir deste e da equação (8), obteve-se a porosidade inicial.

Quadro 7 – Índice de vazios e porosidade inicial.

| D_r (%) | 70 % | 25 % |
|-----------|-------|-------|
| e_o | 0,708 | 0,915 |
| n_o | 0,415 | 0,478 |

Na Figura 19 são representados os resultados obtidos para as estacas de dimensões reduzidas utilizadas por Lee e Chung (2005) e os das estacas hipotéticas com dimensões mais comumente utilizadas.

Observa-se ainda na Figura 19 que quanto maior o diâmetro da estaca, maior a distância em relação ao eixo em que ocorre a melhoria devido à sua instalação. Assim, o efeito na porosidade observado quando da utilização da estaca em modelo reduzido de Lee e Chung (2005) é menor que o efeito para a de diâmetro 0,50 m, por razões óbvias, já que o volume ocupado pela estaca é bem maior nesse caso. Contudo, ao se adimensionalizar o eixo das abscissas, conforme Figura 20, observa-se que a curva de variação da porosidade (Δn) passa a depender somente da compactidade do solo.

Com relação à Figura 20, pode-se observar que para a relação r/d (distância ao eixo da estaca/diâmetro da estaca) aproximadamente igual a 3, a variação da porosidade (Δn) também independe da compactidade inicial do solo, ou seja, para uma distância em relação ao eixo da estaca de três vezes o seu diâmetro, a melhoria devido sua instalação (variação da porosidade) é a mesma quer o solo tenha compactidade fofa ou compacta. Ressalta-se aqui que apesar da Figura 20 apresentar curvas para duas compactidades apenas, foram determinadas curvas para várias outras compactidades, tendo, todas essas curvas apresentado a característica de interceptarem-se no mesmo ponto relativo à posição $r/d=3$.

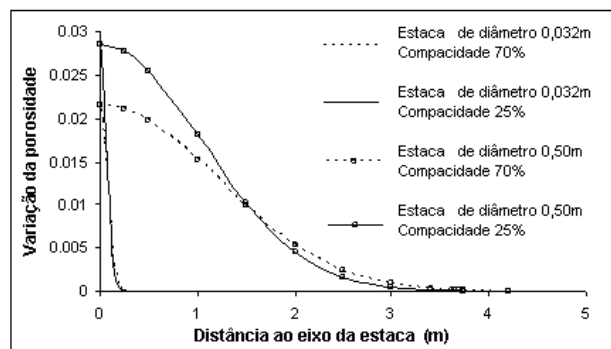


Figura 19 – Variação da porosidade (Δn) em função da distância ao eixo para as estacas ensaiadas por Lee e Chung (2005) e para as de maior dimensão (Conde de Freitas, 2010).

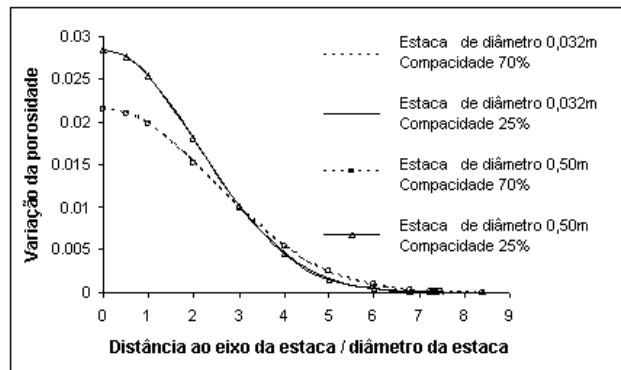


Figura 20 – Variação da porosidade (Δn) em função da distância ao eixo/diâmetro para as estacas ensaiadas por Lee e Chung (2005) e para as de maior dimensão (Conde de Freitas, 2010).

Para valores superiores a 3 a variação da porosidade é similar para ambas as compacidades. Para valores inferiores a 3 a variação da porosidade é mais pronunciada para a compacidade fofa. Cabe destacar que o comportamento das Figuras 19 e 20 se refere a uma estaca isolada.

Cabe lembrar que o modelo de melhoria de Alves (1998) parte do princípio que a melhoria é implementada apenas lateralmente, ao longo do trecho do fuste, não havendo melhoria abaixo do nível da ponta da estaca.

Tal aspecto não foi percebido nas análises numéricas. De fato, a Figura 18 ilustra um valor de resistência por atrito mobilizado obtido numericamente quase constante, ligeiramente decrescente com o espaçamento. Tal ocorrência pode ser explicada a partir do fato de que as características de transferência de carga das estacas simuladas (Quadro 5) foram determinadas pelo critério sugerido pelo US Corps of Engineers (2005). Como os valores do ângulo de atrito e do peso específico do solo (com as melhorias devido à instalação das estacas) variaram pouco (Quadro 3) o mesmo ocorreu para os limites de atrito disponibilizados (122,45 a 154,84 N). Deste modo, os resultados das análises efetuadas com o Plaxis 3D Foundation mostraram um comportamento do atrito mobilizado quase constante, ligeiramente decrescente com o espaçamento relativo (Figura 18).

Já a resistência de ponta revela, na análise numérica, o mesmo pico para o espaçamento relativo s/d de 3, o que não foi observado experimentalmente. Porém, em termos médios, os resultados foram bem próximos, indicando o potencial do Plaxis 3D Foundation, bem como a adequação do procedimento estabelecido nesta dissertação do estudo do efeito de execução em função do modelo de Alves (1998).

4.2.3 - Resultados para a série F_i

Para a Série F_i , cujas características estão indicadas no Quadro 8, foram efetuados ajustes dos carregamentos nas análises numéricas, conforme apresentado no Quadro 9, até que os recalques obtidos chegassem ao nível fixado experimentalmente (0,5 mm). Assim como na série S_i , em todas essas análises também foram implementadas as melhorias dos parâmetros do solo avaliadas para as configurações em planta ilustradas na Figura 11. Os resultados obtidos com relação às cargas mobilizadas, para cada s/d , para o nível de recalque de 0,5 mm são apresentados no Quadro 10, em que, conforme posição ocupada, ilustrada na Figura 6 (a), designou-se a estaca 1 como a central, as 2, 4, 6 e 8 como laterais e as 3, 5, 7 e 9 como de canto.

Quadro 8 - Parâmetros do bloco - Análises dos ensaios de Lee e Chung (2005).

| | | | |
|---------------------------------|----------|-------------------|-------------------|
| Elemento utilizado na modelagem | - | "floor" | - |
| Material Model | - | Linear elástico | - |
| Peso específico | γ | 78,5 | kN/m ³ |
| Espessura da placa | d | 0,020 | m |
| Módulo de Elasticidade | E | $2,1 \times 10^8$ | kN/m ² |
| Coefficiente de Poisson | ν | 0,1 | - |

Os valores de carga média por estaca no grupo foram bastante próximos para a série F_i , para cada espaçamento relativo, quer nos resultados experimentais, quer nas simulações pelo Plaxis 3D Foundation. A maior diferença ocorreu para o ensaio F2, da ordem de 5%. Para o ensaio F2 foi gerada a malha de elementos finitos menos refinada, o que justifica a diferença obtida. A análise numérica revelou uma maior redistribuição de cargas, com maior transferência de carga para as estacas periféricas, em

relação às centrais. Por outro lado, os resultados experimentais revelam o contrário, ou seja, maiores valores de carga no centro em relação à periferia da placa, como indicado na Figura 21. A impressão que se tem é que a placa utilizada nos ensaios experimentais era mais flexível do que aquela simulada numericamente. Porém, os dados da placa utilizados nas análises foram os mesmos descritos por Lee e Chung (2005) e apresentados no Quadro 8.

Quadro 9 - Carga total aplicada em N - Série Fi.

| Análises | Carga total experimental | Carga total Plaxis 3D Foundation |
|----------|--------------------------|----------------------------------|
| Série F2 | 3384 | 3550 |
| Série F3 | 3807 | 4100 |
| Série F4 | 3906 | 3840 |
| Série F5 | 3915 | 3840 |

Quadro 10 - Valores de carga em N para recalque de 0,5 mm - Série Fi. Valores da análise Plaxis 3D Foundation e experimentais (em parênteses)

| Análises | Média | Central | Lateral | Canto |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Série F2 | 394 (376) | 254 (463) | 435 (357) | 442 (372) |
| Série F3 | 456 (423) | 251 (384) | 516 (429) | 499 (425) |
| Série F4 | 427 (434) | 341 (574) | 504 (393) | 423 (440) |
| Série F5 | 427 (435) | 395 (502) | 475 (426) | 438 (427) |

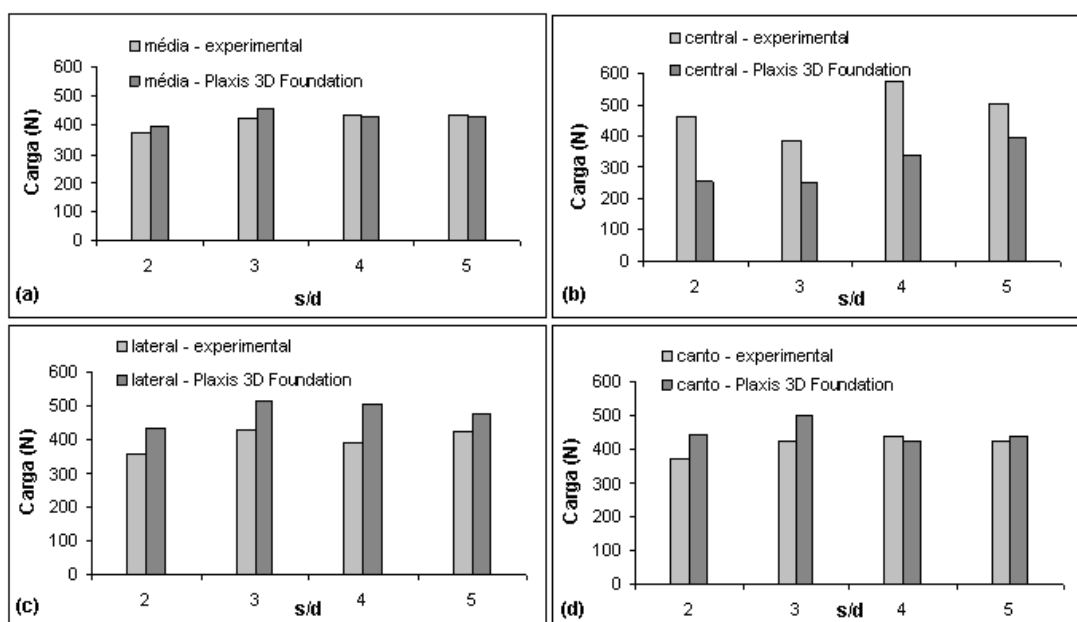


Figura 21 – Valores de carga média (a), valores de carga na estaca central (b), nas estacas laterais (c) e de canto (d) para a Série F_i (Conde de Freitas, 2010).

5 - CONCLUSÕES

Foi estabelecido um procedimento para a estimativa da melhoria após a instalação de um grupo de estacas, desenvolvido por Conde de Freitas (2010) a partir da contribuição de Alves (1998). A melhoria do solo devida à instalação foi estimada, a partir das características iniciais do solo antes da instalação de um grupo de estacas em modelo reduzido em solo arenoso.

i) Série S

Para a simulação da Série S, com solo contemplando a melhoria, o recalque encontrado na análise foi de 0,51 mm, equivalente ao valor de 0,5 mm obtido experimentalmente.

Quanto ao mecanismo de transferência de carga observado na análise numérica, uma parcela maior da carga total foi resistida por atrito e, conseqüentemente, uma parcela menor foi resistida pela ponta, comparados aos valores experimentais.

ii) Série S_i

Para a série S_i , o mesmo padrão de variação da resistência total com o espaçamento relativo s/d foi observado, tanto na instrumentação como também nas simulações numéricas. Os resultados foram muito próximos com a utilização do Plaxis 3D Foundation, contemplando o procedimento de melhoria proposto com base em Alves (1998), quando comparados aos obtidos experimentalmente. A mesma tendência de aumento da carga, para o deslocamento de 0,5 mm foi observada, ou seja, uma maior rigidez foi obtida para o espaçamento relativo s/d igual a 3, tanto na simulação numérica como na instrumentação. O aspecto da curva de resistência total versus deslocamento relativo sugere indicar que para a densidade original da areia, de 70%, o efeito de instalação é mais pronunciado para s/d igual a 3. Para menores espaçamentos relativos, as estacas são tão próximas que a parcela de deslocamento é relevante em relação à densificação real. À medida que o espaçamento aumenta, além do valor s/d de 3, a tendência é o efeito se reduzir.

iii) Variação da porosidade em função da distância ao eixo de uma estaca isolada

Foi verificada a variação da porosidade (Δn) em função da distância ao eixo de uma estaca isolada conforme Alves (1998) para solo de compactidade densa (70%) e fofa (25%). Para ambos os casos considerou-se o índice de vazios mínimo ($e_{\min}=0,57$) e o índice de vazios máximo ($e_{\max}=1,03$), estimados em função dos pesos específicos secos mínimo e máximo determinados por Lee e Chung (2005). Para a areia em estudo, ao adimensionalizar-se o eixo das abscissas observou-se que a curva de variação da porosidade (Δn) passa a depender somente da compactidade do solo. Para uma distância em relação ao eixo da estaca de três vezes o seu diâmetro, a melhoria devido à sua instalação (variação da porosidade) é a mesma, quer o solo tenha compactidade fofa ou compacta.

iv) Série F_i

Para a série F_i , os valores de carga média por estaca no grupo foram bastante próximos para cada espaçamento relativo, quer nos resultados experimentais, quer nas simulações pelo Plaxis 3D Foundation.

A análise numérica revelou uma maior redistribuição de cargas, com maior transferência de carga para as estacas periféricas, em relação às centrais. Por outro lado, os resultados experimentais revelam o contrário, ou seja, maiores valores de carga no centro em relação à periferia da placa.

Maior número de análises deve ser procedido, principalmente com estacas de dimensões usuais, de forma a melhor investigar o comportamento observado. Acompanhando a expectativa da pesquisa experimental de Lee e Chung (2005) de obter resultados qualitativos, as análises numéricas procedidas em areia acompanharam a mesma tendência qualitativa dos resultados experimentais. Todavia, para a série F_i , apenas os valores médios experimentais forneceram resultados compatíveis com as análises numéricas.

REFERÊNCIAS

- Alves, A. M. L. (1998). Contribuição ao estudo de estacas de compactação em solos granulares, 190f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Alves, A. M. L., Lopes, F. R. (2001). A contribution to the study of compaction piles in granular soils. *Proceedings of the Inter. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Istanbul, v.3, p. 1683-1686.
- Butterfield, R. e Banerjee, P. K. (1971). The elastic analysis of compressible piles and pile groups. *Géotechnique*, London, v. 21, n. 1, p. 43-60.
- Butterfield, R. e Douglas, R. A. (1981). *Flexibility Coefficients for the Design of Piles and Pile Groups*. London : Construction Industry Research and Information Association, 1981. 79 p. (CIRIA Report, n. 108).
- Brinkgreve, R. B. J. et al. (2007). *Plaxis 3D Foundation*. Version 2. Netherlands: Plaxis BV, 5 v.
- Chan, R. K. S. (2006). *Foundation Design and Construction*. Hong Kong: The Government of the Hong Kong Special Administrative Region. (Geo Publication, n. 1).
- Chow, Y. K. (1989). Axially loaded piles and pile groups embedded in a cross-anisotropic soil. *Géotechnique*, London, v. 39, N°2, p 203-212.

- Cheung, Y. K., Tham, L.G.; Guo, D. J. (1988). Analysis of pile group by infinite layer method. *Géotechnique*, London, v. 38, N°3, p 415-431.
- Conde de Freitas, A. (2010). *Contribuição ao estudo do efeito tridimensional de instalação e de grupo em estacas cravadas em areias*, 231f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil). PGCIV, UERJ.
- Fleming, W. G. K.; Weltman, A. J.; Randolph, M. F.; Elson (1992). *Piling Engineering*. 2nd ed. London: Surrey University Press.
- Gusmão Filho, J. (2006). *Desempenho de Obras Geotécnicas*. Pernambuco: Editora Universitária da Universidade Federal de Pernambuco.
- Gusmão Filho, J. (1995). *Contribuição à prática de fundações: a experiência do Recife*. 251f. Tese de Professor Titular do Departamento de Tecnologia e Geociências da Escola de Engenharia - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Lee, S. e Chung, C. (2005). An Experimental Study of the Interaction of Vertically Loaded Pile Groups in Sand. *Canadian Geotechnical Journal*, n. 42, p. 1486-1493.
- Hooper, J. A. e Wood, L. A. (1997). Comparative behaviour of raft and piled foundations. *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo. v. 1. p 545-550.
- Meyerhof, G. G. (1976). Bearing capacity and settlements of piled foundations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v. 102, N° GT3, p 197-228.
- NBR 6484 (2001). Solo, Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio.
- Poulos, H. G. (1968). Analysis of the settlement of pile groups. *Geotechnique*, London, v. 18, n. 4, p. 449-471.
- Poulos, H. G. e Davis, E. H. (1980). *Pile Foundation Analysis and Design*. John Wiley & Sons.
- Randolph, M. F. (1994). Design methods for pile groups and piled rafts. *Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, v. 5, p 61-82.
- Randolph, M. F. e Wroth, C. P. (1979). An analysis of the vertical deformation of pile groups. *Géotechnique*, London, v. 29. n. 4, p 423-439.
- Skempton, A. W. (1953). Discussion on piles and pile foundations: settlement of pile foundations. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Switzerland, v. 3, p. 172
- Souza Pinto (2000). *Curso de Mecânica dos Solos*. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.
- Terzaghi, K. e Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. 2nd ed. New York: Wiley. 729 p.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (2005). *Design of pile foundations*. Honolulu, Hawaii: University Press of the Pacific.
- Velloso, D. A. e Lopes, F. R. (2002). *Fundações*. Rio de Janeiro: Editora COPPE/ UFRJ, v. 2.
- Vesic, A. S. (1969). Experiments with instrumented pile groups in sand. *American Society for Testing and Materials*. Performance of deep foundations. Philadelphia. (ASTM Special Technical Publication, n. 444). p. 177-222.