



FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS SUBMETIDAS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO: COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA

Jonatan Garrido Jung

Engenheiro Civil/Mestrando em Geotecnia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul
jonatan.jung@gmail.com

Resumo. *No projeto de fundações de torres de comunicação ou de linhas de transmissão, os esforços de tração, na maioria dos casos, são determinantes para as dimensões da fundação, e portanto as dimensões necessárias para atender aos esforços de arrancamento serão suficientes para suportar os demais esforços atuantes na fundação. Este trabalho apresenta uma comparação entre os resultados obtidos através da aplicação de diversos métodos de previsão de capacidade de carga de fundações superficiais submetidas a esforços de tração. As previsões foram confrontadas com resultados de provas de carga de arrancamento, de onde foram obtidos os parâmetros geotécnicos dos solos onde ocorreram os ensaios e a resistência à tração das fundações ensaiadas. Da comparação dos resultados encontrados constatou-se que o método do Cilindro de atrito e o de Grenoble foram os que obtiveram previsões de resistência ao arrancamento mais próximas das provas de carga na maioria das situações.*

Palavras-chave: *Fundações. Prova de carga. Tração.*

1. INTRODUÇÃO

As estruturas predominantes em linhas de transmissão são torres metálicas, autoportantes ou estaiadas, com a função de suspender ou ancorar os cabos condutores por onde a energia elétrica é transmitida. Para manter as torres estáveis no solo são necessárias fundações que devem ser projetadas de maneira a resistir aos esforços

aos quais as estruturas são submetidas. O vento na estrutura e nos cabos gera momentos que tendem a tombar a torre, resultando em solicitações de tração nas fundações (ASHCAR E LAUREANO, 1983).

Nos projetos dessas fundações os esforços de tração são, na maioria dos casos, preponderantes, o que significa que as dimensões necessárias para suportar os esforços de tração, são suficientes para resistir às demais cargas na fundação (ASHCAR, 1999). Devido ao fato de os esforços de tração estarem geralmente definindo as dimensões das fundações, é importante lançar mão de métodos de cálculo de previsão de capacidade de carga ao arrancamento que tenham maior acurácia, e que desta forma conduzirão a um menor consumo de material e conseqüentemente a menores custos de projeto.

As fundações de obras correntes de Engenharia – prédios e casas – em geral não estão sujeitas a esforços de tração, sendo este, portanto, um tópico pouco difundido entre a maioria dos profissionais.

2. METODOLOGIA

Neste trabalho são apresentados alguns dos principais métodos de estimativa de capacidade de carga à tração constante na bibliografia disponível sobre o assunto. A partir da pesquisa de resultados de provas de carga de fundações superficiais submetidas ao arrancamento, foi possível obter os parâmetros geotécnicos dos locais de ensaio e desta forma aplicar os métodos de cálculo para estimar a capacidade de carga das

fundações ensaiadas. Na análise dos resultados, foi feita uma comparação entre os valores obtidos através de cada um dos métodos de previsão de capacidade de carga e os valores de resistência encontrados nas provas de carga de arrancamento.

O objetivo principal deste trabalho é verificar a acurácia dos métodos de previsão de capacidade de carga de fundações à tração, determinando quais deles apresentam valores mais próximos aos das provas de carga de arrancamento.

3. MÉTODOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA À TRAÇÃO

A seguir são apresentados alguns dos principais métodos de previsão de capacidade de carga a tração constantes na literatura. Os métodos são:

- a) do tronco de cone;
- b) do cilindro de atrito;
- c) de Balla;
- d) de Grenoble;
- e) de Meyerhof e Adams.

Os métodos estudados são embasados na teoria do equilíbrio limite, admitindo-se que o solo apresenta comportamento rígido-plástico, sem considerar a ocorrência de deslocamentos antes da ruptura.

3.1 Método do tronco de cone

É considerado um dos métodos mais antigos para estimativa de capacidade de carga para fundações tracionadas. O Método do Tronco de Cone define a capacidade ao arrancamento de uma fundação como sendo equivalente à soma de duas parcelas, o peso próprio da mesma e o peso de um tronco de cone cuja base menor corresponde à base da fundação, cuja geratriz forma um ângulo α com a vertical e cuja base maior corresponde à interseção da superfície lateral com o nível do terreno. Para o caso de fundações de base quadrada ou retangular, considera-se um tronco de pirâmide ao invés de um tronco de cone. A superfície fictícia de ruptura pode ser observada na Fig. 1.

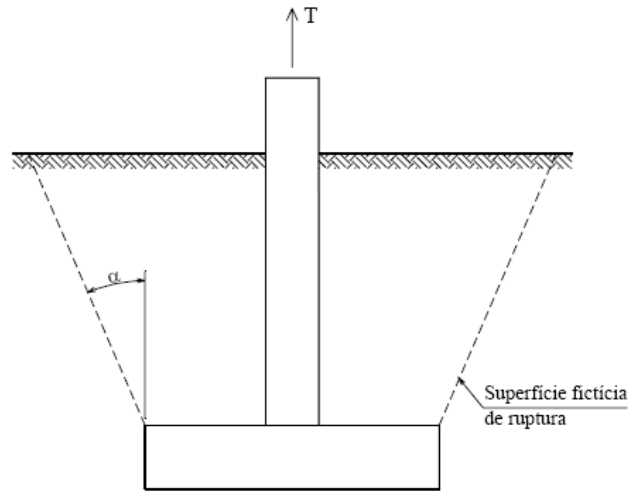


Figura 1. Superfície fictícia de ruptura do Método do Cone

3.2 Método do cilindro de atrito

Este método considera que a superfície de ruptura ocorre ao longo de um cilindro (ou prisma, no caso de fundações retangulares) cuja base coincide com a base da fundação, como mostra a Fig. 2. A capacidade de carga é calculada somando-se o peso do solo contido no cilindro, o peso próprio da fundação e a resistência proveniente da aderência ao longo da superfície de ruptura (SANTOS, 1985).

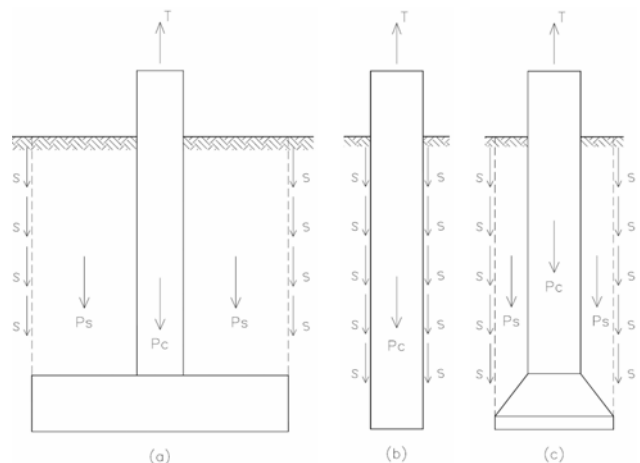


Figura 2. Método do Cilindro de Atrito, no caso de sapata, (b) tubulão sem base alargada ou estaca e (c) tubulão com base alargada (DANZIGER, 1983)

O Método do Cilindro de Atrito representa um avanço em relação ao Método do Cone, pois é mais próximo aos princípios

da Mecânica dos Solos. Sua principal limitação decorre, fundamentalmente, de ter sido desenvolvido com base em uma superfície de ruptura admitida, que muitas vezes não corresponde à realidade. Para o caso de estacas e tubulões sem alargamento de base ou tubulões curtos com alargamento de base, a superfície de ruptura admitida é bastante próxima da realidade. (SANTOS, 1985)

3.3 Método de Balla

O método desenvolvido por Balla (1961) estima a capacidade de carga de uma fundação submetida a esforços de tração como sendo a soma do peso próprio da fundação, do peso do volume de solo contido na superfície de ruptura e das tensões de cisalhamento mobilizadas ao longo dessa superfície de ruptura (Fig. 3). A superfície de ruptura sugerida é formada por parte de uma circunferência que tem tangente vertical no contato com a base da fundação, e que se desenvolve até a superfície do terreno, onde forma um ângulo de $(45^\circ - \phi/2)$ com a horizontal (ϕ é o ângulo de atrito interno do solo).

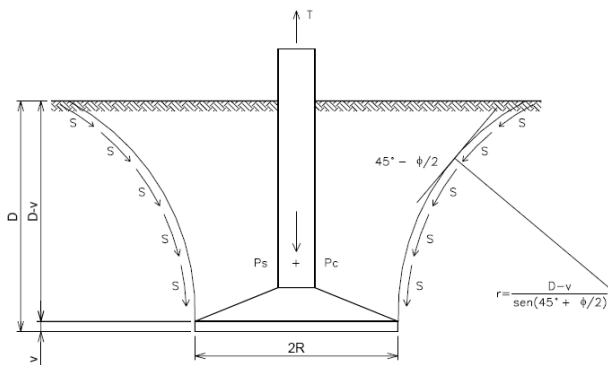


Figura 3. Superfície de ruptura do Método de Balla (BALLA, 1961)

3.4 Método de Grenoble

Este método foi desenvolvido na Universidade de Grenoble com apoio da *Electricité de France* (EDF), organização estatal francesa de energia elétrica, e abrange praticamente todos os tipos de fundações normalmente utilizados. O

método teve origem a partir de ensaios em modelos reduzidos, onde foram observados os mecanismos de ruptura do solo. Além desses ensaios, diversas provas de carga em tamanho natural foram realizadas por uma série de instituições dos países membros da *Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques à Haute Tension* (CIGRE) (SANTOS, 1985).

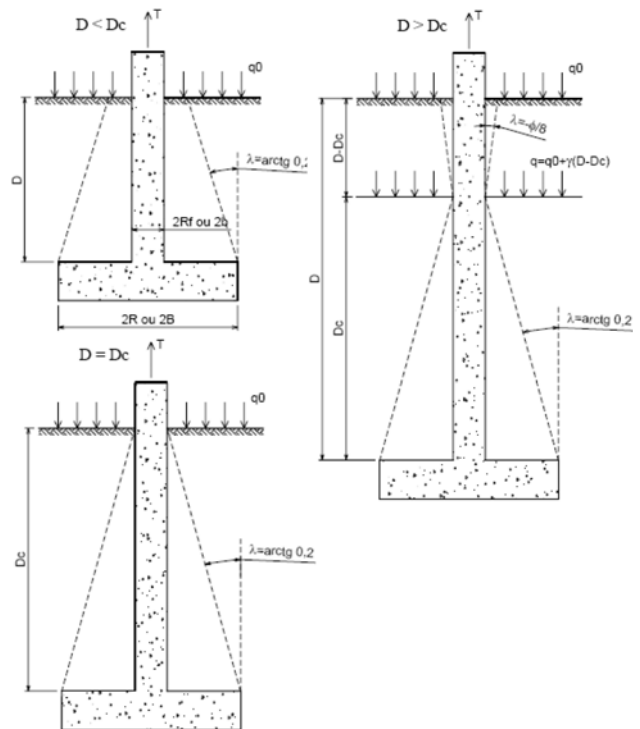


Figura 4: Formas de ruptura para sapatas em solos fracos pelo método de Grenoble. (MARTIN, 1966, apud GARCIA, 2005)

O comportamento das fundações superficiais é comandado pelos diferentes processos de ruptura, de acordo com a categoria do solo, onde classificam-se como (DANZIGER E PINTO, 1979; SANTOS, 1985):

a) solos fracos: solos argilosos, com elevado grau de saturação e ângulo de atrito interno $\phi < 15^\circ$;

b) solos resistentes: solos arenosos (saturados ou não) e argilosos com baixo grau de saturação e ângulo de atrito interno $\phi > 15^\circ$.

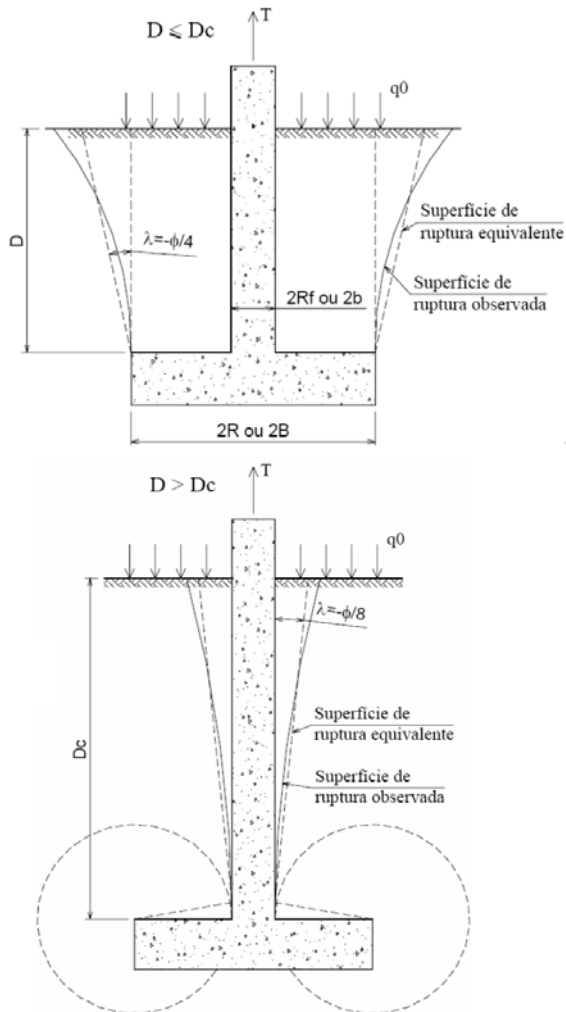


Figura 5: Superfície de ruptura para sapatas em solos resistentes pelo método de Grenoble (MARTIN, 1966, apud GARCIA, 2005).

Diferentes formulações são aplicadas de acordo com a profundidade da fundação (D) em relação à chamada profundidade crítica (D_c) (MARTIN, 1966). Esta profundidade foi estimada, a partir de ensaios, como sendo $5(R-R_f)$ para o caso de sapatas circulares, onde R é o raio da base e R_f o raio do fuste. Para sapatas retangulares a profundidade crítica é equivalente a $5(B-b)$, onde B é a metade da largura da base e b é metade da largura do fuste.

3.5 Método de Meyerhof e Adams

O processo de cálculo apresentado no trabalho de Meyerhof e Adams (1968) foi desenvolvido com base em uma série de

experimentos realizados em modelos reduzidos utilizando discos metálicos de diâmetros variados. As superfícies de ruptura encontradas nos testes apresentaram formas complexas, e devido a este fato foram feitas diversas simplificações em relação às superfícies reais observadas para desenvolvimento da teoria para o cálculo da capacidade de carga à tração. Os autores fazem ainda uma distinção entre as formas de ruptura para casos de fundações rasas e profundas (Fig. 11) (SANTOS, 1985, p. 21).

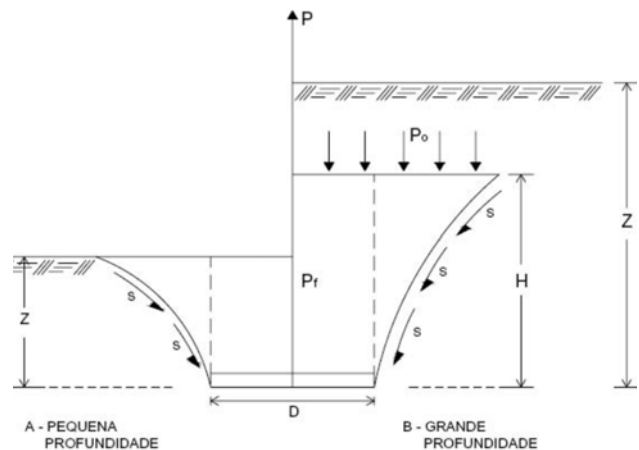


Figura 6: Formas de ruptura do Método de Meyerhof e Adams (MEYERHOF; ADAMS, 1968 apud BESSA, 2005)

A carga de ruptura é atingida quando uma massa de solo em forma de um tronco pirâmide é levantada e a superfície de ruptura atinge o nível do terreno, considerando fundações a pequenas profundidades. No caso de fundações a grandes profundidades, a superfície de ruptura não atinge o nível do terreno devido à compressibilidade e às deformações da massa de solo acima da base da fundação. Sendo tal superfície de ruptura limitada a um comprimento vertical H onde atua uma pressão de sobrecarga P_0 .

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os métodos de cálculo empregados nesta pesquisa foram comparados com os resultados de provas de carga de tração apresentadas em outros dois trabalhos, sendo estes Santos (1985) e Dias (1987).

4.1 Análise tendo como referência Santos (1985)

O autor analisou fundações do tipo sapata, ensaiadas próximos a cidade do Rio de Janeiro, em um solo residual de gnaise. A área onde foram realizadas as provas de carga localiza-se no topo de um pequeno morro onde foi construído um platô por terraplenagem. O morro é constituído de um manto de solo residual maduro, resultante da alteração de gnaise, de cor vermelha, com espessura média aproximada de 2,50m, que se sobrepõe a uma camada bastante espessa de solo bastante intemperizado, de cor amarela, tendo ambos baixo grau de saturação. O nível de lençol freático não foi localizado em sondagens até 15,0m.

Baseado nos parâmetros geotécnicos do local dos ensaios descritos por Santos (1985), foram adotados nesse trabalho os seguintes valores:

- a) peso específico do solo $\gamma = 15,3 \text{ kN}$
- a) ângulo de atrito interno $\phi = 25,5^\circ$;
- b) coesão $c = 29 \text{ kN/m}^2$;

Para o método do Cone foram feitas previsões para duas situações, uma desfavorável e outra favorável, utilizando ângulo de arrancamento $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 25^\circ$ respectivamente.

Foram analisadas as provas de carga das quatro sapatas ensaiadas, cujas dimensões são apresentadas na Fig. 7.

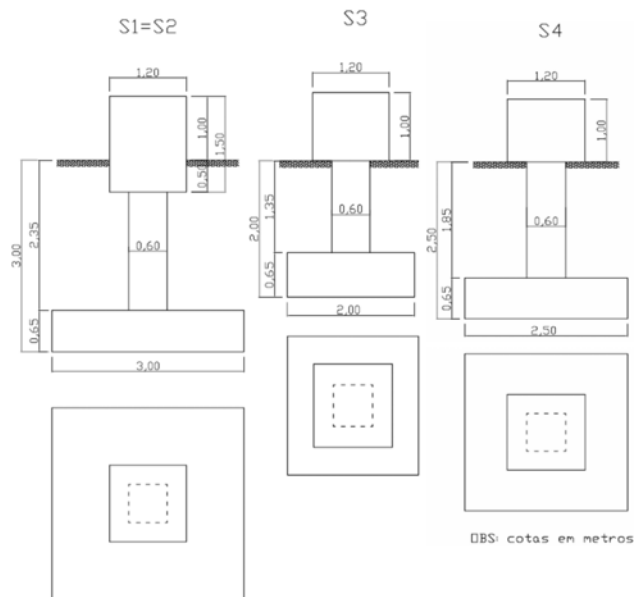


Figura 7: Dimensões das sapatas analisadas (SANTOS, 1985)

Os métodos de previsão de capacidade de carga foram empregados utilizando-se os parâmetros de geotécnicos adotados e as dimensões das fundações. A previsão fornecida pelas diferentes formulações foi comparada com a carga de ruptura atingida pelas sapatas.

Os ensaios de arrancamento foram executados tracionando as fundações com incrementos de carga sucessivos, divididos em determinados intervalos de tempo. Santos (1985) adotou como carga de ruptura aquela correspondente ao estágio de carga imediatamente anterior àquele para o qual se observou uma falha do sistema estrutural, falha esta que, em função do tipo de fundação pode corresponder a um movimento de corpo rígido da mesma ou um aumento brusco dos deslocamentos. A falha do sistema estrutural das sapatas ocorreu devido à plastificação do solo acima da base da sapata, em uma região que iniciava próximo ao extremo da base, evoluindo até a superfície do terreno na medida em que se aumentavam as cargas. Para cargas próximas à ruptura, ocorriam grandes deslocamentos das fundações.

Carga de ruptura das sapatas S1 e S2. No gráfico da Fig. 8, são apresentados os valores obtidos através da aplicação de cada

um dos métodos cálculo, em comparação com a média dos valores obtidos nas provas de carga das sapatas S1 e S2. Este valor foi de 1245 kN, representado no gráfico pela linha em vermelho.

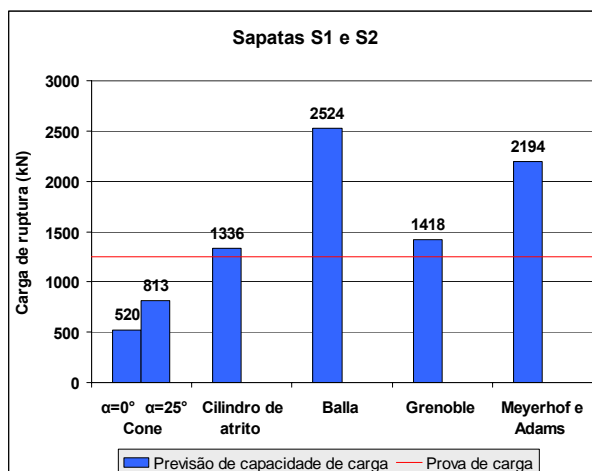


Figura 8: Previsões de capacidade de carga à tração para as sapatas S1 e S2

Dentre as estimativas de capacidade ao arrancamento fornecidas pelos diferentes métodos, a do Cilindro de Atrito foi a mais próxima do valor obtido nas provas de carga das sapatas S1 e S2, com erro de 7% para mais. Em seguida aparece o método de Grenoble que apresentou resultado 14% acima da resistência atingida nos ensaios.

Os métodos de Meyerhof e Adams e de Balla forneceram as maiores previsões de capacidade carga, com valores, respectivamente, 76 e 103% acima da carga de ruptura das fundações ensaiadas. Já o método do Cone foi o único a subestimar a resistência das sapatas, provendo resultados com erro de 58% para menos, com $\alpha = 0^\circ$, e 35% para menos com $\alpha = 25^\circ$.

Carga de ruptura da sapata S3. No gráfico da Fig. 9, são apresentados os valores obtidos através da aplicação de cada um dos métodos cálculo, em comparação com o valor obtido na prova de carga da sapata S3. Este valor foi de 574 kN, representado no gráfico pela linha em vermelho.

Na previsão de resistência para a sapata S3, três métodos subestimaram a capacidade resistente da fundação. Foram eles o do Cone, do Cilindro de Atrito e de Grenoble.

O método do Cilindro de Atrito forneceu o resultado mais próximo ao valor da prova de carga, com erro de 13% para menos. Um valor bastante semelhante foi obtido no cálculo através do método de Grenoble com previsão 15% menor que o valor do ensaio de arrancamento.

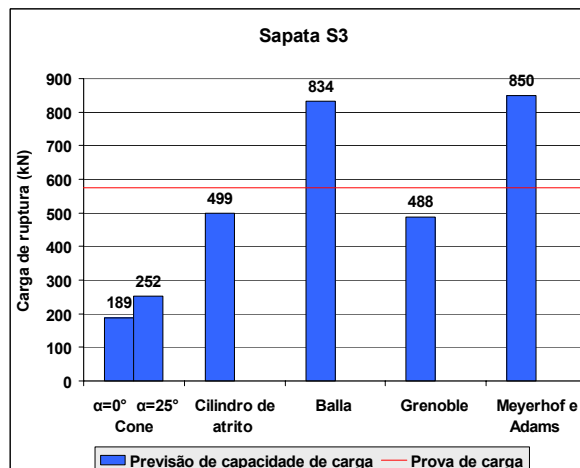


Figura 9: Previsões de capacidade de carga à tração para a sapata S3

As estimativas dos métodos de Balla e de Meyerhof e Adams superestimaram a capacidade de resistência à tração da sapata, com valores respectivamente 45% e 48% acima da prova de carga. O método do Cone foi o que previu a menor capacidade para a fundação, apresentando erro de 67% para menos com $\alpha = 0^\circ$, e 56% para menos com $\alpha = 25^\circ$, em relação à resistência observada em campo.

Carga de ruptura da sapata S4. No gráfico da Fig. 10, são apresentados os valores obtidos através da aplicação de cada um dos métodos cálculo, em comparação com o valor obtido na prova de carga da sapata S4. Este valor foi de 1137 kN, representado no gráfico pela linha em vermelho.

Comparando o resultado da prova de carga de arrancamento da sapata S4 com os resultados dos cálculos, novamente os métodos do Cone, do Cilindro de Atrito e de Grenoble subestimaram a capacidade resistente da fundação.

A estimativa de capacidade de carga mais próxima ao valor dos ensaios de tração foi a do método de Grenoble, com diferença

de 23% para menos. Na sequência, dois métodos apresentaram o mesmo erro percentual, sendo o do Cilindro de Atrito 25% para menos, e o de Meyerhof e Adams 25% para mais.

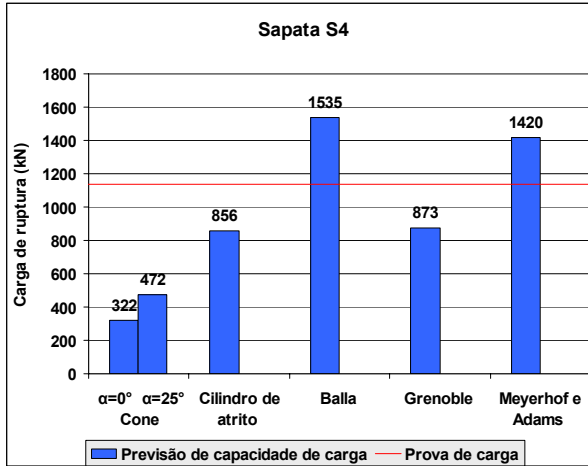


Figura 10: Previsões de capacidade de carga à tração para a sapata S4

Em ambas as situações de cálculo para o método do Cone, a previsão foi bastante abaixo da resistência observada em campo, sendo -72% para $\alpha = 0^\circ$, e -58% para $\alpha = 25^\circ$. O método de Balla foi o que previu a maior capacidade de carga ao arrancamento para a sapata em estudo, com erro de 35% para mais.

4.2 Análise tendo como referência Dias (1987)

Dias (1987) escolheu um local representativo, formado por um perfil de solo de comportamento laterítico, onde foi definido o campo de testes para ensaios de tração. Neste local foram construídas dez fundações do tipo sapata em verdadeira grandeza que posteriormente foram tracionadas. Foi realizado um estudo geotécnico do perfil no local, e através de ensaios tácteis e visuais, verificou-se que o solo é argiloso em todo o perfil, sendo mais arenoso no horizonte A. O horizonte A tem cerca de 80 cm de espessura e o horizonte B atinge 3,0 m de profundidade.

Verificou-se que o peso específico aparente médio do solo no horizonte A era igual a $14,4 \text{ kN/m}^3$ e no horizonte B igual a

$13,1 \text{ kN/m}^3$. Pelo fato do solo de reaterro ser uma mistura entre o horizonte A e B, foi considerado nos cálculos um valor de peso específico aparente médio para o reaterro de $13,7 \text{ kN/m}^3$.

Nos ensaios realizados por Dias (1987) também foi analisada a influência do processo executivo do reaterro, usando-se a situação extrema de compactação superficial com retroescavadeira e com compactação por camadas dentro de certas especificações. Nesse trabalho, nos cálculos pelo método de Grenoble para as fundações com compactação superficial, foi usada a formulação para solos fracos, enquanto que para as fundações com compactação por camadas a formulação usada foi a de solos resistentes.

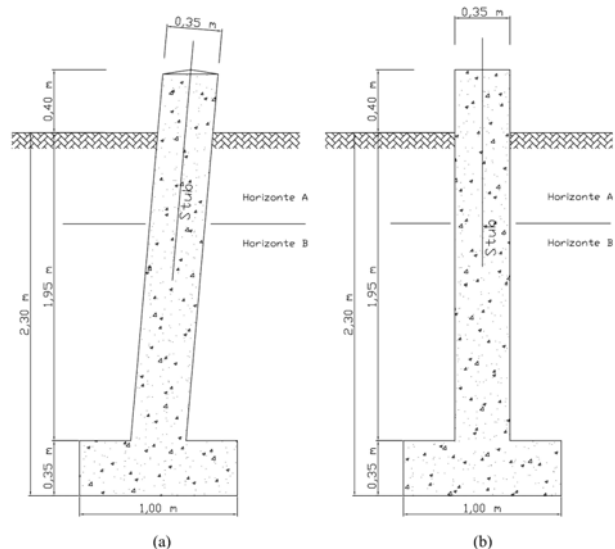


Figura 11: Fundação ensaiada com (a) fuste inclinado e (b) fuste vertical (DIAS, 1987)

As sapatas ensaiadas nas provas de carga de tração foram construídas com base quadrada, de largura igual a 1,0 m, assentes a uma profundidade igual a 2,30 m, executadas todas com as mesmas dimensões. Este tipo de fundação com fuste inclinado é bastante utilizado, entretanto como as teorias de capacidade de carga ao arrancamento consideram o fuste da sapata vertical, foram executadas quatro destas sapatas com fuste vertical. As fundações verticais são semelhantes, diferindo apenas na inclinação do fuste que é normal à base. A Fig. 11

mostra as dimensões de uma fundação com fuste inclinado e vertical.

As fundações superficiais solicitam principalmente os solos superficiais, e estes sofrem grande influência da variação do teor de umidade devido à alternância das estações climáticas (DIAS, 1990). O local de realização das provas de carga é caracterizado por solos de comportamento laterítico, que, entre outras particularidades, são parcialmente saturados. A determinação da resistência ao cisalhamento de solos parcialmente saturados é complexa. Estes solos apresentam uma poro pressão negativa, que tende a desaparecer com o aumento da saturação, diminuindo a resistência ao cisalhamento (DIAS, 1987). Por esse motivo foram adotadas nesse estudo duas situações para os cálculos das estimativas de capacidade, com diferentes propriedades do solo, uma desfavorável à resistência e outra favorável. São elas:

Situação desfavorável:

- ângulo de atrito interno $\phi = 25,5^\circ$;
- coesão $c = 11 \text{ kN/m}^2$;
- ângulo de cone $\alpha = 0^\circ$.

Situação favorável:

- ângulo de atrito interno $\phi = 27^\circ$;
- coesão $c = 36 \text{ kN/m}^2$;
- ângulo de cone $\alpha = 25^\circ$.

Utilizando os parâmetros geotécnicos do solo e as dimensões das fundações ensaiadas, foi feito o cálculo da previsão de capacidade de carga à tração utilizando a formulação de cada um dos métodos. A seguir são apresentados os resultados calculados para as situações desfavorável e favorável, cujos valores encontrados podem ser observados nos gráficos das Fig. 12 a 15, e comparados com os valores de carga de ruptura obtida nas provas de carga de acordo com a inclinação do fuste e processo executivo do reaterro.

A carga de ruptura dos ensaios de Dias (1987) foi considerada como sendo aquela que corresponde aos deslocamentos não estabilizados. Para melhor caracterizar esta carga, foram aplicados estágios de carregamento bem próximos, em geral

inferiores a 10% da carga de ruptura, para não haver indefinição no seu valor.

Carga de ruptura para sapatas inclinadas com compactação superficial. No gráfico da Fig. 12, são apresentados os valores obtidos através da aplicação de cada um dos métodos de cálculo, em comparação com a média dos valores obtidos nas provas de carga das fundações inclinadas onde a compactação do reaterro foi executada superficialmente. Este valor foi de 117 kN, representado no gráfico pela linha em vermelho.

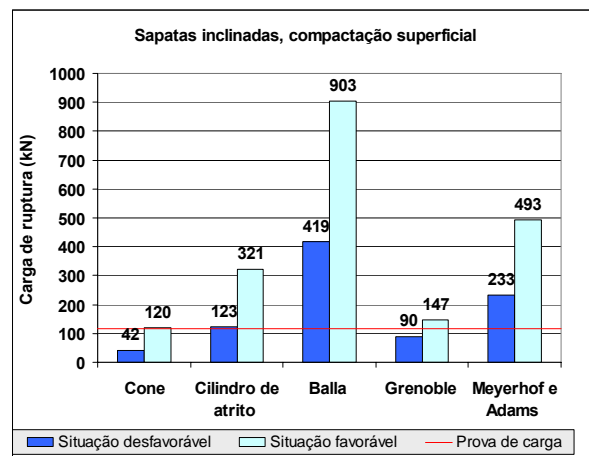


Figura 12: Previsões de capacidade de carga à tração para sapatas inclinadas com compactação superficial

Na simulação utilizando os parâmetros de solo desfavoráveis, o método do Cilindro de Atrito foi o que apresentou estimativa mais próxima da prova de carga, com resultado apenas 5% acima dos valores observados em campo. Na sequência aparece o método de Grenoble que obteve resultado 23% abaixo da resistência atingida nos ensaios de arrancamento.

O método de Balla estimou a capacidade de carga ao arrancamento como sendo em torno de 259% acima do verificado nos ensaios de campo, sendo o mais divergente de todos. Por Meyerhof e Adams, obteve-se uma previsão de capacidade duas vezes maior do que a carga de ruptura da sapata real. Já o método do Cone forneceu como resultado um valor que era apenas 36% da capacidade observada

nas provas de carga, sendo o que previu o menor valor para a carga de ruptura.

Nos cálculos para a situação mais favorável, o método do Cone foi o que mais se aproximou dos resultados das provas de carga, com diferença de apenas 3% para mais. O resultado por Grenoble apresentou erro de 26% para mais.

O método do Cilindro de Atrito forneceu resultado em torno de 170% acima do valor obtido nos ensaios de campo. Dos cálculos por Meyerhof e Adams e por Balla obtiveram-se previsões muito além da ruptura das provas de carga, sendo 322% e 674% acima da capacidade real observada, respectivamente.

Carga de ruptura para sapatas verticais com compactação superficial. No gráfico da Fig. 13, são apresentados os valores obtidos através da aplicação de cada um dos métodos de cálculo, em comparação com a média dos valores obtidos nas provas de carga das fundações verticais onde a compactação do reaterro foi executada superficialmente. Este valor foi de 173 kN, representado no gráfico pela linha em vermelho.

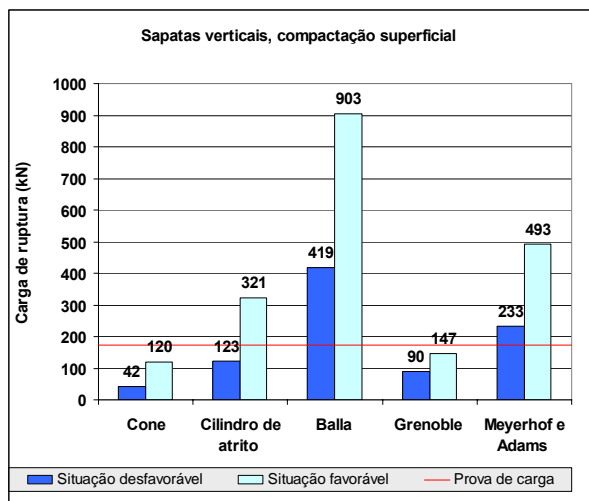


Figura 13: Previsões de capacidade de carga à tração para sapatas verticais com compactação superficial

Na comparação com os resultados dos cálculos utilizando os parâmetros de solo mais desfavoráveis, três métodos subestimaram a capacidade resistente das

fundações. Foram eles o do Cone, do Cilindro de Atrito e de Grenoble.

Calculando-se pelo método do Cilindro de Atrito obteve-se o resultado mais próximo ao valor da prova de carga, com erro de 29% para menos. Em seguida, porém com erro para mais, aparece Meyerhof e Adams com previsão 35% maior que o valor do ensaio de arrancamento.

O método do Cone foi o que previu a menor capacidade para a fundação, com um resultado de apenas 24% da resistência observada em campo. Grenoble, que também subestimou a resistência, apresentou diferença de -48% em relação à prova de carga. Já o método de Balla previu a maior capacidade de resistência à tração, com valor 143% acima da ruptura da prova de carga.

Empregando-se os parâmetros de solo favoráveis, o método de Grenoble foi o que mais se aproximou dos resultados das provas de carga, com 15% de diferença para menos em relação ao valor verificado nos ensaios. A seguir está o método do Cone, com 31% de diferença para menos.

Os métodos do Cilindro de Atrito e Meyerhof e Adams forneceram resultados, respectivamente, 86% e 186% acima da carga de ruptura das fundações ensaiadas, valores estes consideravelmente elevados. O resultado mais divergente veio do método de Balla, com previsão 424% maior do que o valor da prova de carga.

Carga de ruptura para sapatas inclinadas com compactação por camadas. No gráfico da Fig. 14, são apresentados os valores obtidos através da aplicação de cada um dos métodos de cálculo, em comparação com a média dos valores obtidos nas provas de carga das fundações inclinadas onde a compactação do reaterro foi executada por camadas. Este valor foi de 201 kN, representado no gráfico pela linha em vermelho.

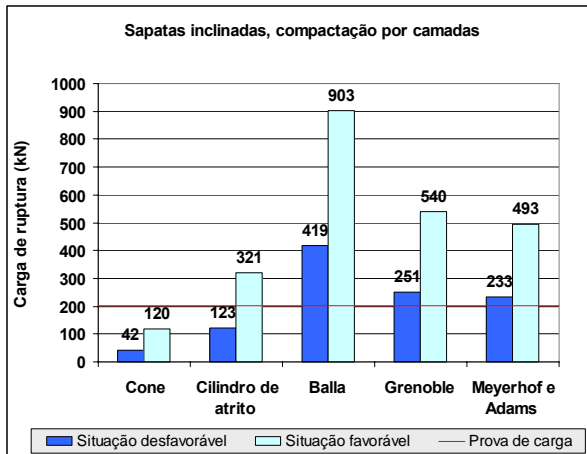


Figura 14: Previsões de capacidade de carga à tração para sapatas inclinadas com compactação por camadas

Comparando-se o resultado das provas de carga de arrancamento com os resultados dos cálculos utilizando os parâmetros de solo mais desfavoráveis, os métodos do Cone e do Cilindro de Atrito subestimaram a capacidade resistente das fundações.

A estimativa de capacidade de carga mais próxima ao valor dos ensaios de tração foi a do método de Meyerhof e Adams, com diferença de 16% para mais. O método do Cilindro de Atrito subestimou a capacidade resistente da fundação, com erro de 39% para menos, já o de Grenoble superestimou com erro de 25% para mais quando comparados com a resistência das provas de carga.

O método de Cone foi o que previu a menor capacidade, com um valor que era somente 21% da resistência observada em campo. O método de Balla foi o mais discrepante, fornecendo como previsão uma capacidade que era 109% acima da observada em campo.

Através da utilização dos parâmetros de solo para a situação favorável, o método do Cone foi o único a subestimar a resistência da fundação aos esforços de tração, e foi também o que mais se aproximou da capacidade atingida nas provas de carga, com diferença de 40% para menos. O método do Cilindro de Atrito aparece na sequência superestimando a carga de ruptura em 60%.

Os métodos de Meyerhof e Adams e de Grenoble forneceram resultados, respectivamente, 146% e 169% acima da carga de ruptura das fundações ensaiadas. A maior divergência foi obtida da previsão calculada por Balla, cujo valor foi 350% superior aos valores dos ensaios de campo.

Carga de ruptura para sapatas verticais com compactação por camadas. No gráfico da Fig. 15, são apresentados os valores obtidos através da aplicação de cada um dos métodos de cálculo, em comparação com a média dos valores obtidos nas provas de carga das fundações verticais onde a compactação do reaterro foi executada por camadas. Este valor foi de 269 kN, representado no gráfico pela linha em vermelho.—

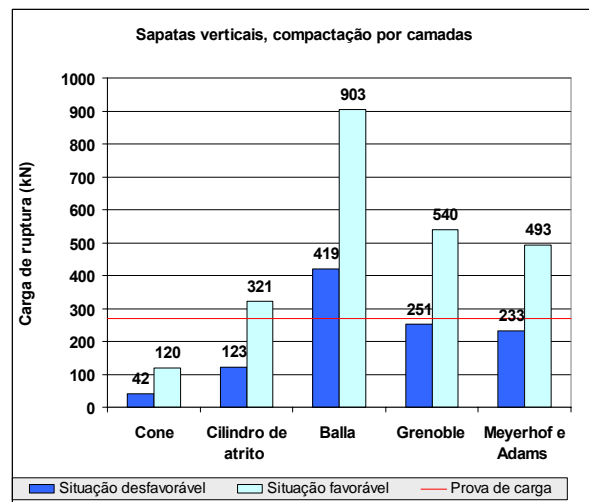


Figura 15: Previsões de capacidade de carga à tração para sapatas verticais com compactação por camadas

O método de Grenoble foi o que mais se aproximou da capacidade atingida nas provas de carga, com diferença de 7% para menos, na situação desfavorável. A seguir está o método de Meyerhof e Adams, com erro de 13% para menos em sua previsão de capacidade. Nesta situação de cálculo, apenas o método de Balla superestimou a resistência da fundação ao arrancamento, com diferença de 56% acima da capacidade atingida nas provas de carga.

A estimativa pelo Cilindro de Atrito subestimou em cerca da metade a resistência

da fundação, com resultado 54% menor que a resistência das provas de carga. O método do Cone foi o que apresentou maior erro, tendo como previsão uma capacidade que era somente 16% da resistência atingida nos ensaios.

Dos cálculos para a situação favorável, o resultado do método do Cilindro de Atrito foi o mais próximo da capacidade atingida nas provas de carga, com diferença de 19% para mais. Na sequência aparece o método do Cone, o único a subestimar a capacidade da fundação, com previsão 55% abaixo da resistência verificada nos ensaios de campo. Os métodos de Meyerhof e Adams e de Grenoble forneceram valores respectivamente, 83% e 101% acima do valor de ruptura das provas de carga. Do método de Balla resultou a maior discrepância, cujo valor foi 236% acima da carga de ruptura das fundações ensaiadas.

5. CONCLUSÕES

O método do Cilindro de atrito foi o que obteve previsões de resistência ao arrancamento mais próximas das provas de carga, na maioria das situações. Quando foram calculadas previsões para a situação desfavorável e favorável, os resultados das provas de carga estiveram dentro da faixa de valores obtidos para as duas situações.

O método de Grenoble também apresentou bons resultados, semelhantes aos do Cilindro de Atrito em alguns casos, porém com variações percentuais maiores em relação às provas de carga. Todavia, as previsões de Grenoble utilizando a formulação para solos resistentes com profundidade da fundação maior do que a profundidade crítica foram bastante acima da carga de ruptura das provas de carga.

O método do Cone subestimou a capacidade das fundações em praticamente todos os casos, sendo este o mais conservador entre os métodos estudados. Este foi também o que apresentou maior diferença entre os valores de previsão de carga nas situações desfavoráveis e favoráveis, contudo o método, além do peso

específico do solo, depende apenas do ângulo de cone, e este foi definido nas diferentes situações com valores extremos ($\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 25^\circ$) o que justifica a grande variação.

Já o método de Balla superestimou a capacidade de carga das fundações em todas as situações de cálculo, com valores acima da carga de ruptura das fundações ensaiadas. Em alguns casos os valores foram demasiadamente elevados.

O método de Meyerhof e Adams também superestimou a capacidade da fundação, e em praticamente todos os casos apresentou resultados superiores aos das provas de carga.

Os métodos de Balla e Meyerhof e de Adams forneceram valores de capacidade de carga na situação favorável pouco maiores do que duas vezes o valor previsto para a situação desfavorável, demonstrando que estes métodos possuem semelhante sensibilidade à variações dos parâmetros geotécnicos.

Agradecimentos

O autor agradece ao professor Nilo Cesar Consoli pela orientação, e ao CNPq-MCT e a CAPES-MEC pelo apoio neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ASHCAR, R. Recomendações e informações técnicas sobre fundações de linhas de transmissão. In: Encontro Regional Latinoamericano do Cigré, 8. 1999, Ciudad del Este. **Anais ...** Ciudad del Este: CIGRÉ, 1999.

ASHCAR, R.; LAUREANO, C. A. **Estudo e Aplicações Práticas de Fundações para Linhas de Transmissão**. 2. ed. São Paulo: CESP, 1983.

BALLA, Á., 1961. The Resistance to Breaking out of Mushroom Foundations for Pylons. In: International Conference on Soil



Mechanics and Foundation Engineering, 5. 1961, Paris. **Anais...** Paris: 1961.

BESSA, A. O. **Avaliação da resistência lateral em estacas escavadas com trado submetidas à tração.** 2005. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

DANZIGER, F.A.B. **Capacidade de Carga de Fundações Submetidas a Esforços Verticais de Tração.** 1983. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

DANZIGER, F. A. B.; PINTO, P. C. Alguns critérios para dimensionamento de fundações sujeitas a esforços de tração. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 5. 1979, Recife. **Anais ...** Recife: Cigré-Brasil, 1979.

DIAS, R. D. **Aplicação de pedologia e geotecnia no projeto de fundações de linhas de transmissão.** 1987. 349 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

_____. Influência do processo construtivo do reaterro na capacidade de carga de sapatas tracionadas. In: Encontro Nacional da Construção, 10. 1990, Gramado. **Anais ...** Porto Alegre: SENGE, 1990.

GARCIA, O. C. **Influência da qualidade da compactação dos reaterros na capacidade de carga de fundações submetidas a esforços de tração.** 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MARTIN, D., 1966, *Étude à la Rupture de Différents Ancrages Solicités*

Verticalement. 1966. Thesis of Docteur-Ingénieur, Faculté des Sciences de Grenoble.

MEYERHOF, G.G., ADAMS, J.I., 1968, “The Ultimate Uplift Capacity of Foundations”, **Canadian Geotechnical Journal**, v. 5, n. 4 (Nov), p. 225-244.

SANTOS, A. P. R. **Análise de fundações submetidas a esforços de arrancamento pelo método dos elementos finitos.** 1985. 367 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.