

Comportamento Carga - Recalque de Microestacas Alluvial Anker Executadas no Solo do Distrito Federal

Felipe Alvarez Zuluaga

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, felipealvarezzuluaga@gmail.com

Renato Pinto da Cunha

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, rpcunha@unb.br

RESUMO: A microestaca Alluvial Anker é um tipo de fundação injetada autoperfurante de armação tubular schedule de bulbo variável, maiormente utilizada como estrutura de fundação de aterros sobre solo mole e aerogeradores, caracterizada pela produtividade na execução e economia. Neste artigo apresenta-se uma avaliação carga-recalque deste tipo de fundação executada na Argila Porosa de Brasília no campo experimental da SOLOTRAT Engenharia Geotécnica Ltda., onde foram realizados ensaios SPT, SPT-T e Triaxiais (Mendoza, 2013) para definir e/ou estimar os parâmetros geotécnicos. Para este, fim foi executada uma microestaca de 8,0m de comprimento e 0,20m de diâmetro e testada via prova de carga estática a qual forneceu a curva carga-recalque característica de um comportamento de estaca escavada, e não de injetada. Este resultado foi analisado por diferentes metodologias de interpretação de provas de carga, para se estimar a carga limite, definida pelo teste em 420kN. Além disso, pelo fato da estaca não estar instrumentada foram implementadas diferentes metodologias para tentar estimar as parcelas de atrito lateral e ponta, tendo sido estimados valores de 92% para o atrito lateral e 8% para ponta, em média. Verificou-se uma alta dispersão dos resultados na estimativa da capacidade de carga com os métodos semi-empíricos e observou-se a necessidade de se obter fatores empíricos mais apropriados para estimar a capacidade de carga em microestacas tipo Alluvial Anker.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de Carga, Alluvial Anker, Capacidade de Carga, Recalque, Fundação Profunda.

1 INTRODUÇÃO

As propriedades do solo de Brasília-DF são resultado do alto grau de intemperismo e lixiviação e estes solos são chamados de “argila porosa” por engenheiros geotécnicos locais (Guimarães e Camapum de Carvalho, 2003). Estes solos apresentam alto índice de vazios e consequentemente baixos pesos específicos, além de uma estrutura bastante porosa, baixa resistência à penetração ($SPT < 4$) e são instáveis quando submetidos a variações no estado de tensões, apresentando, em consequência, um comportamento colapsível (Araki, 1997). Por isto a maioria das estruturas geotécnicas construídas em Brasília pode se estender até 30 m de profundidade, onde o nível d'água, em geral, se encontra a 5 m de

profundidade, salvo as regiões próximas à borda do lago. (Camapum de Carvalho *et al.*, 1993). As microestacas Alluvial Anker são um tipo de fundação relativamente nova, moldada in loco e inserida ao solo por perfuração rotativa e injeção simultânea. Estes tipos de microestaca são ideais como fundação em solo argilosos moles como o caso de Brasília. Estas microestacas vêm sendo usadas com sucesso, referenciando a obra do DER como reforço do aterro construído na nova passarela do viaduto da EPTG (Estrada Paque Taguatinga), mostrando-se como uma solução interessante em solo mole, com vantagens técnicas, econômicas e ambientais em relação às estacas pré-moldadas, tendo como grande diferencial a velocidade de execução e o custo (Barbosa, 2009). Dadas as condições que caracterizam o

solo de Brasília, surge a necessidade de entender o comportamento de fundações profunda, onde atualmente os projetos precisam adequar-se melhor a seu entorno e orçamento. Diversos tipos de estacas como (coluna de brita, estaca raiz, microestacas, estaca pré-moldada) são implementadas como solução geotécnica, não necessariamente sendo a melhor opção custo/benefício.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção do artigo, serão descrita a localização geográfica do campo experimental SOLOTRAT Ltda., bem como, as características geotécnicas da argila porosa de Brasília. Os resultados da investigação geotécnica (SPT e SPT-T) e os parâmetros geotécnicos obtidos dos ensaios laboratoriais (Triaxial CD) que foram fornecidos pela tese doctoral de Mendoza (2013).

2.1 Local de Estudo

A empresa SOLOTRAT Engenharia Geotécnica Ltda., executora deste tipo de fundação no DF, criou um campo experimental de fundações novo em seu terreno, localizado no SAI SMAS, Conj. A1 – Lote 06 – Guará-DF, com cota de elevação de 1084 msnm. A área possui topografia suave e vegetação do cerrado, cujo perfil geotécnico é composto por camadas de solo laterítico vermelho argiloso, denominado pela comunidade geotécnica como “Argila porosa de Brasília”, a qual geralmente apresenta baixa capacidade de suporte nas camadas mais superficiais.

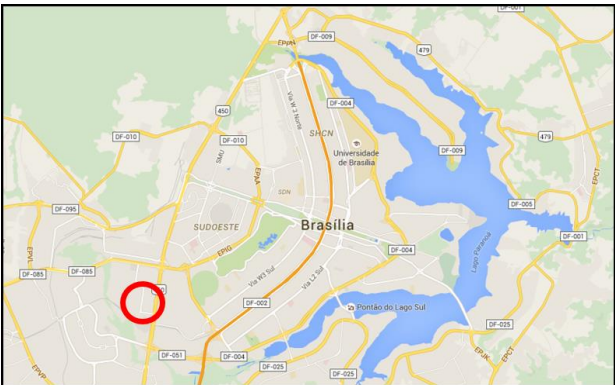


Figura 1. Localização do campo experimental da SOLOTRAT Ltda.

2.2. Ensaios de Campo

Para a obtenção da caracterização do solo, foram feitas seis perfurações espaçadas de 2,40 m, com profundidades de 8 a 15 m. Cinco perfurações são por meio de cravação vertical contínua (SPT). Com os resultados dos ensaios, SPT e SPT-T, foram reconhecidas cinco camadas de solo. O perfil geotécnico foi definido por Mendoza (2013) da seguinte maneira: A primeira camada de 0 a 5,0 m, argila arenosa de cor vermelha com consistência mole. A segunda camada foi até 8,0 m, composta por silte arenoso de cor marrom, consistência média. A terceira camada de 8,0 m a 9,0, silte arenoso de cor branca e consistência dura. Após os 9,0 m encontra-se uma argila siltosa de consistência média de cor marrom escura. A partir dos 14,5 m até o final da perfuração, encontrou-se um silte arenoso de cor amarela e consistência rija. As camadas foram denominadas por Mendoza (2013) como (AAMV), (SAAM), (SADB), (ASMMO) e (SARA) respectivamente, e o lençol freático encontrou-se a 4,5 m de profundidade Fig 2.

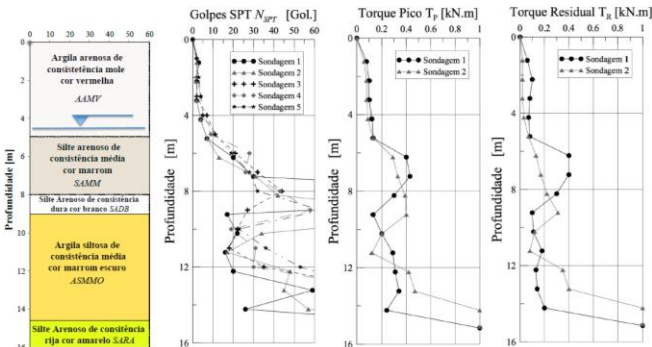


Figura 2. Resultados de ensaios SPT e SPT-T (Mendoza, 2013)

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos (Mendoza, 2013)

Camada	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (MPa)	ν
AAMV	14	29	9	0,35
SAAM	20	35	38	0,29
SADB	50	39	60	0,27
ASMMO	28	35	43	0,29

2.3 Capacidade de Carga

Para estimar a capacidade de carga da microestaca Alluvial Anker, foram aplicadas metodologias analíticas e semi-empíricas para o cálculo de estacas e grampos baseadas em

ensaios de campo como o SPT, o SPT-T, sendo avaliadas considerando o perfil geotécnico apresentado na média das sondagens e o processo executivo da microestaca como “misto” (escavada + injetada), devido a isto, foram usados diferentes fatores empíricos de estaca disponíveis na literatura técnica, apresentando valores muito altos de resistência por ponta, a qual foi retirada da resistência global. Apresentando uma alta dispersão dos resultados na estimativa da capacidade de carga, devido a inexistência de fatores e norma específica para este tipo de patente.

3 DESCRIÇÃO E EXECUÇÃO DAS ESTACAS

A microestaca a ser testada foi executada com um tubo schedule liso de 63mm de diâmetro com uma ponteira de 13 cm soldada no começo da haste. O tubo é acoplado a uma perfuratriz, compondo o sistema de perfuração mecânica, e após essa montagem, é realizada a injeção de calda de cimento até o furo ficar preenchido pela mesma (Fig.3). O tubo schedule é utilizado como armadura da microestaca existente em todo o seu comprimento. A calda de cimento utilizada na possuía o fck de 20 MPa.

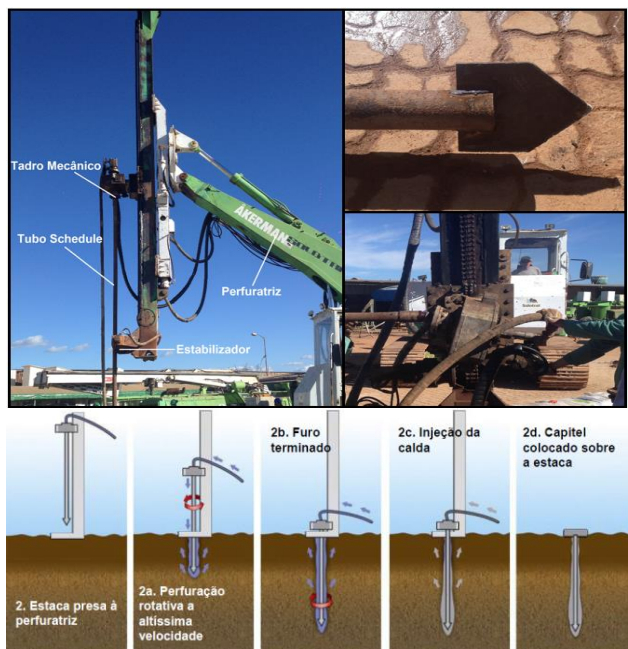


Figura 3. Processo executivo da microestaca Alluvial Anker (Barbosa, 2009).

O sistema de reação foi composto por 4 microestacas também do tipo Alluvial Anker com 0,25m de diâmetro e 12m de comprimento, também armada com o tubo schedule em todo o seu comprimento, Fig. 4.



Figura 4. Microestacas executadas para montagem PCE.

Além dessas estacas serem projetadas para resistir aos esforços de tração provocados pelo empuxo do macaco hidráulico, também se obtêm maior estabilidade e uma melhor distribuição da carga aplicada evitando a excentricidade da carga.

4 PROVA DE CARGA

Para avaliação do carga-recalque da microestaca Alluvial Anker, foi realizada uma prova de carga estática, conforme ABNT NBR 12131/2006.

4.2 Montagem da Prova de Carga

Para conformar o sistema, as estacas de reação foram conectadas por vigas de aço em cruz servindo como suporte ao macaco hidráulico de 2000 kN, entre eles foi colocada uma célula de carga de 1000kN com precisão de 0,1kN e de leitura digital.

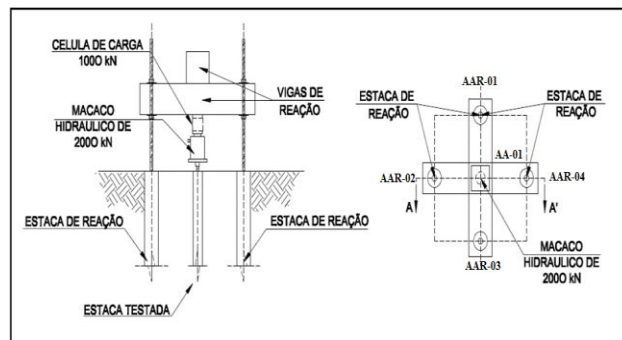


Figura 5. Esquema da montagem da prova de carga



Figura 6. Montagem da prova de carga

No topo da estaca testada, foi soldada uma placa de aço de 5cm de espessura, onde foram colocados um macaco hidráulico e quatro (4) extensômetros, e em cada estaca de reação foram colocados um (1) extensômetros, como se apresenta na Fig. 7.



Figura 7. Extensômetros nas microestacas de reação e de teste

Na microestaca testada, foi solicitada com carregamento do tipo “lento”, composto por estágios iguais e sucessivos de 30 kN até atingir a carga limite do sistema solo-estaca, onde os acréscimos de carga não ultrapassaram os 20% da carga de trabalho.

Foram considerados dois critérios para finalizar o ensaio: deslocamento superior ao 20% do diâmetro; e carga aplicada na estaca não estabilizada com recalques incessantes. Com isto, segundo Décourt (2008), é determinada a “ruptura” convencional em estacas escavadas, dado que elas não apresentam “ruptura” física. Desta forma ao serem atingidos ambos critérios, a prova de carga foi paralisada.

4.3 Resultado da Prova de Carga

Com a ideia de se levar a microestaca até sua carga limite, conseguiu-se aplicar 13 carregamentos estabilizados apresentados na Tab. 2. Terminada a estabilização do último estágio de 390 kN, incrementou-se para 420 kN, quando não se conseguiu mais manter a carga aplicada estabilizada, apresentando neste momento recalques excessivos para um mesmo nível de carregamento.

Tabela 2. Informações dos estágios de carregamento

Estágio de Carregamento	Carga (kN)	Δ medio (mm)
1	30	0,28
2	61,12	0,53
3	90,68	0,90
4	121,18	1,27
5	150,77	1,74
6	181,05	2,16
7	210,51	2,59
8	240,51	3,07
9	270,31	4,00
10	300,26	4,92
11	330,40	5,90
12	360,26	7,77
13	390,20	12,34
14	420,10	20,50

O carregamento máximo aplicado no topo da estaca foi de 420,10 kN e a leitura do recalque máximo médio correspondente foi de 20,5mm.

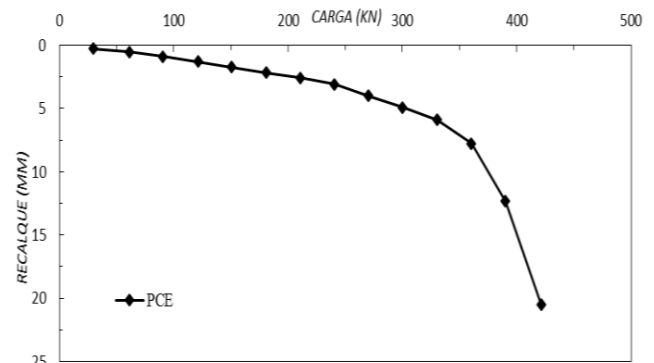


Figura 8. Resultado da prova de carga executada.

Foram utilizadas metodologias consagradas na literatura técnica de fundações para se estimar a carga limite do sistema solo-microestaca. Na Tab. 3, é apresentado o resumo dos resultados dos métodos e critérios utilizados, onde se adotou o valor de 420 kN como carga limite, o qual foi obtido da média aritmética dos métodos

de Van der Veen (1953), Van der Veen Modificado por Aoki (1976) e o método de conceito de rigidez de Décourt (2006-2008), porque foram os que melhor representaram o que aconteceu em campo com a prova de carga estática quando houve um aumento no recalque ao tentar se manter a carga em 420 kN.

Tabela 3. Valores de carga limite obtidos da análise da curva carga-recalque

Método	Carga limite (kN)	Carga de Trabalho* (kN)	Δ máx (mm)
Van der Veen (1953)	426	213	25,0
NBR 6122 (2010)	350	175	6,9
Van der Veen Mod (1976)	426	213	25,0
Chin-Kondner (1971)	556	278	200,0
Decourt (1996)	472	236	--
Davissom (1972)	380	190	11,0

No trabalho realizado por Hirany e Kulhawy (1989), os resultados de provas de carga com curva carga-recalque típico de estacas escavadas, foram divididas em três regiões claramente identificadas, como região inicial linear, região de transição e região linear final. No resultado obtido na microestaca Alluvial Anker, foram identificadas estas regiões delimitadas da seguinte forma: linear inicial é definida pelos estágios de carregamento 1 ao 8, a região de transição vai do estágio 9 até o 13, e a região linear final começa no estágio 14, mostrando que a microestaca Alluvial Anker apresenta comportamento tensão-deformação típico de estacas escavadas, como se apresenta na Fig. 9.

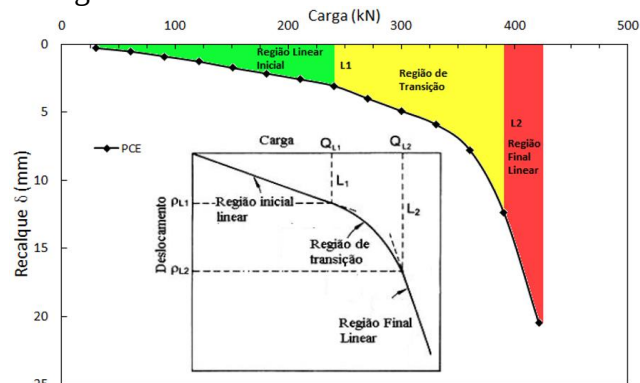


Figura 9. Identificação de regiões segundo Hirany e Kulhawy (1989)

Na Fig. 10, foram plotados os valores das cargas de trabalho utilizando o FS=2, na

maioria dos métodos e critérios usados para determinar a carga limite da curva carga-recalque obtida, observa-se que os valores encontram-se na região linear inicial. Onde o recalque é inferior a 4mm, o valor obtido pelo método de Chin (1971) para este caso específico superestima a carga limite, o valor de carga de trabalho se encontra na região de transição onde, hipoteticamente, não teria mais um comportamento elástico, portanto menos resiliência no sistema solo-microestaca. Dependendo do uso da microestaca, se for projetada para trabalhar nessa região levaria a recalques diferenciais.

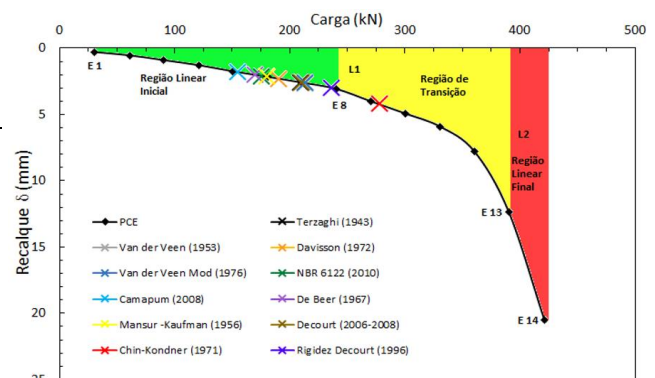


Figura 10. Localização de cargas de trabalho no gráfico das regiões

A curva carga-recalque obtida na prova de carga pode ser descrita com gráficos compostos por dois segmentos retilíneos unidos por um trecho curvo (trecho de transição). O primeiro trecho (linear inicial) corresponde à mobilização da resistência por atrito lateral, com recalque inferior a 4mm. A região de transição que une os segmentos retilíneos apresenta recalques da ordem de 24% até 60% do recalque total medido e em torno de 2,5% até 6,4% em relação ao diâmetro da estaca. O segundo segmento, devido à mobilização da resistência por ponta, mostrando um acréscimo do recalque linear até o fim do ensaio.

4.4 Determinação da parcela de atrito lateral e ponta

A finalidade desta análise foi definir a forma em que trabalha a microestaca Alluvial Anker e ter uma ideia da distribuição da carga entre ponta e fuste, utilizando metodologias consagradas na literatura técnica para definir

estes domínios como as propostas de Décourt (2008) e Camapum de Carvalho (2011).

Na proposta de Décourt (2008), são colocados os dados obtidos da prova de carga em ordem decrescente começando pelos pontos de carga mais elevados, e desta forma são estabelecidas correlações lineares entre $\log Q$ e $\log \delta$. Estes coeficientes de correlação R são elevados ao quadrado obtendo R^2 . Quando o valor de R^2 começa a ser menor do que 1, tem-se a mudança de comportamento descrita como zona de transição. Este método admite que a ponta tenha sido, pelo menos, parcialmente mobilizada. A partir do ponto 2, o R^2 começa a diminuir, mostrando mudança de comportamento, e daí, é escolhido como o ponto de regressão (ver Tab. 3.).

Tabela 4. Determinação do ponto de regressão linear

Ponto	PCE Carga (MN)	Δ (mm)	Regressão Linear R^2
1	0,421	20,49	--
2	0,390	12,33	1,0000
3	0,360	7,77	0,9985
4	0,330	5,90	0,9760
5	0,300	4,92	0,9426
6	0,270	3,99	0,9262
7	0,241	3,06	0,9289
8	0,211	2,58	0,9213
9	0,181	2,15	0,9129
10	0,151	1,74	0,9067
11	0,121	1,27	0,9118
12	0,091	0,89	0,9183
13	0,061	0,53	0,9301
14	0,030	0,28	0,9318

Sendo assim, a partir do ponto 2, a ponta deixa de preponderar, o que se pode conferir pela redução de R^2 . O ponto 2 é um ponto de transição entre o domínio de atrito lateral e o de ponta, esta transição pode incluir alguns pontos até iniciar o domínio do atrito lateral (Vianna, 2000). A reta entre o ponto de regressão (ponto 2) e a carga limite (R_{uc}) fornecida pelo método de Décourt (2008), fornece a informação do limite inferior do domínio do atrito lateral ($Q_{sl} = 0,341 \text{ MN} = 341 \text{ kN}$), apresentado na Fig 11.

Para a microestaca ensaiada, conclui-se que os pontos 1 a 2 definem o domínio da ponta, sendo o ponto 2 a transição. Foram testados diferentes pares de pontos para se obter o melhor ajuste, por exemplo os pontos 4 a 6 apresentam

correlação de 0,9946, mas o limite superior do atrito lateral é levado até 615 kN, o que não aconteceu na realidade. O limite superior do atrito lateral foi identificado com os pontos 2 a 5, os quais se ajustaram melhor à realidade do que a curva com um coeficiente R^2 de 0,9534.

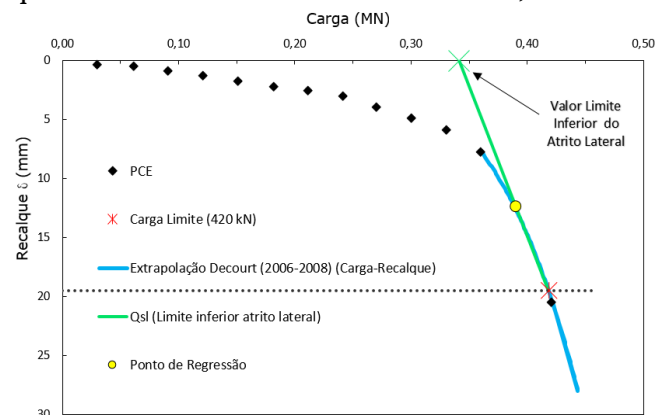


Figura 11. Determinação do limite inferior do atrito lateral

Segundo Décourt (2006-2008), se o carregamento é levado até grandes deformações, dois domínios serão facilmente identificados: o domínio da ponta e o domínio do atrito lateral. No trecho onde a transferência por ponta é predominante, a relação entre a carga e a rigidez é uma curva, tornando-se linear no gráfico Log-Log. Já no trecho onde o atrito lateral é dominante, essa relação é, nitidamente linear, apresentando no gráfico de rigidez relação linear entre a carga e a rigidez, este comportamento é observado em estacas que trabalham predominantemente por atrito lateral como apresentado na Fig 12.

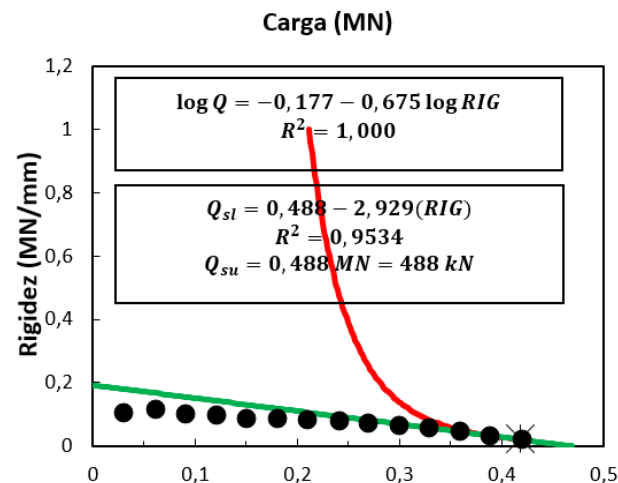


Figura 12. Gráfico de rigidez

Segundo Décourt (2008), sem instrumentação, os valores do atrito lateral jamais serão conhecidos, porém, os mesmos terão que, obrigatoriamente, situar-se entre o limite inferior (Q_{sl}) e superior do atrito lateral (Q_{su}). Se calculou a média deste intervalo para o caso em estudo que corresponde 390kN representando um 92% da carga limite (Fig. 13) para um nível de recalque máximo de 20mm correspondente ao 10% do diâmetro da estaca (Fig. 14).

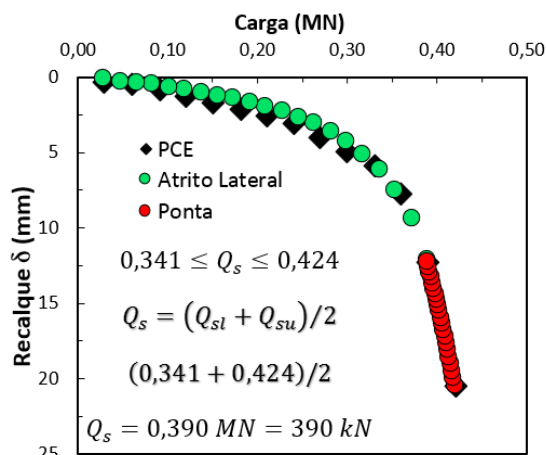


Figura 13. Domínio do atrito lateral

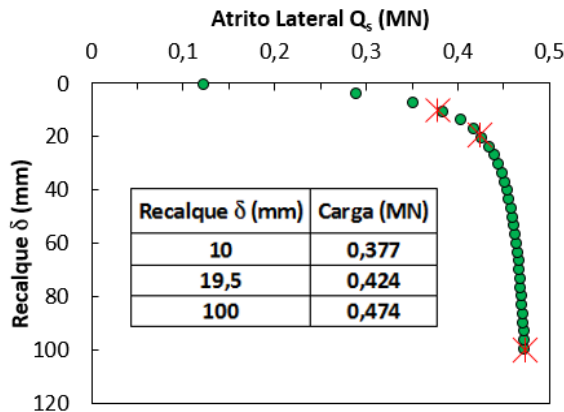


Figura 14. Gráfico do atrito lateral.

Além do método de rigidez de Décourt (2006-2008), também se verificou no método de análise para provas de carga sem instrumentação eletrônica, proposto por Camapum de Carvalho *et al*, (2011). O método descreve o comportamento de uma fundação por meio do coeficiente de recalque, que é a inclinação da parte final reta das curvas no gráfico recalque médio vs Log tempo mostrado na Fig. 15.

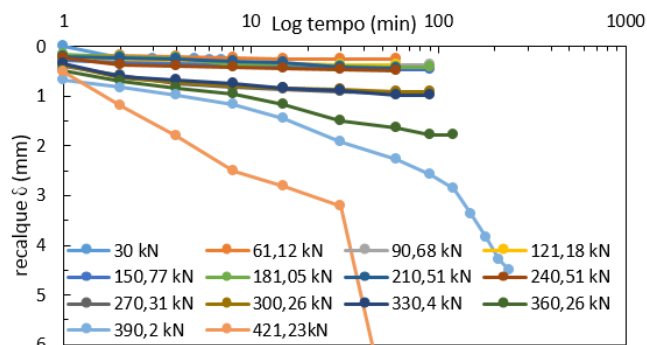


Figura 15. Curvas recalque médio vs log tempo

Com isso, é construído o gráfico de coeficiente de recalque vs carga, onde são identificados os segmentos de reta que permitem interpretar o comportamento carga-recalque de uma fundação estacada mostrado na Fig. 16.

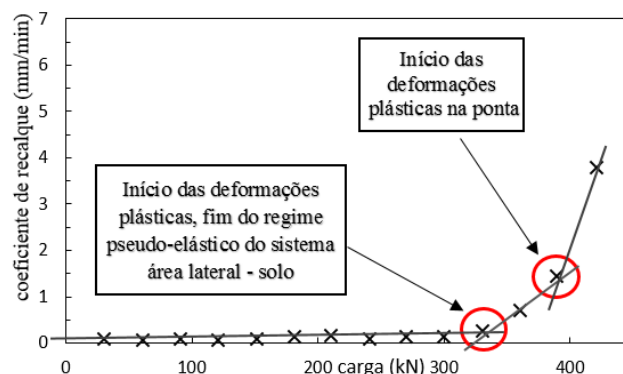


Figura 16. Coeficiente de recalque vs carga

Segundo Valencia & Camapum (2011), o ponto de encontro do primeiro segmento de reta com o segundo segmento da curva carga vs coeficiente de recalque define o início das deformações plásticas no solo, ao fim da região pseudo-elástica do sistema solo-estaca. O segundo ponto de inflexão, ou seja, o encontro do segundo segmento de reta e o terceiro segmento na curva carga vs coeficiente de recalque, corresponde ao início das deformações plásticas do solo abaixo da ponta da estaca, em que a ponta está apoiada.

5. CONCLUSÕES

O comportamento tensão-deformação da microestaca Alluvial Anker foi definido como de estaca escavada, mesmo que se utilize pressão de injeção para sua conformação, isto é, devido ao seu processo executivo, que conforma o fuste de maneira escavada utilizando pressão de injeção mais para

preencher o bulbo, do que para conformar seu fuste, apresentando maior pressão na ponta, a qual vai diminuindo ao longo do seu comprimento, típico de um perfil triangular de pressão. As microestacas injetadas comuns possuem processo executivo diferente que consiste de um sistema de válvulas manchetes espaçadas que vão sendo estouradas de baixo para cima com a pressão de injeção definida para conformar o fuste, apresentando um perfil de pressão de injeção mais retangular ao longo do seu comprimento.

Devido ao processo executivo da Alluvial Anker, o qual apresenta uma injeção da calda de cimento mais direta na ponta; portanto é melhorada esta parcela na resistência global em um nível médio de deformação, que para este caso, a partir de 5mm de recalque, já começa a se manifestar a contribuição por ponta, chegando a um aporte estimado de 8% da carga limite. Desta forma, para o local de estudo ou para perfis geotécnicos com características geotécnicas similares como as apresentadas neste artigo, recomenda-se que a parcela de ponta seja desprezada no cálculo da capacidade de carga. No presente artigo, foi adotado o termo de “carga limite” para se referir à carga de ruptura, uma vez que carga limite é o termo mais apropriado para se referir à “ruptura” em estacas escavadas.

A estaca Alluvial Anker mostra-se como uma solução prática e tecnicamente competente para ser usada na engenharia de fundações, seja como sistema de fundação ou reforço, desde que calculada com base, em parte, nos princípios estudados e recomendados no presente artigo. Entretanto mais estudos são necessários para validar de forma categórica as afirmativas ora apresentadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, Universidade de Brasília e a empresa SOLOTRAT Engenharia Geotecnica Ltda., pelos recursos academicos, técnicos e financeiros fornecidos.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2006) *Norma ABNT NBR 12131: Estacas – Prova de Carga Estática – Método de Ensaio*.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2010). *Norma ABNT NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações*.
- Barbosa, M. (2009) *Alluvial Anker como Alternativa para Fundações em Argila Mole*, Tech. Rep., Solotrat Engenharia Geotécnica Ltda, Brasília, Brasil.
- Camapum de Carvalho, J. e Valencia, Y. (2011) Other Uses of Static Load Test in the Geotechnical Design of Foundations, *Journal DYNA*, Universidad Nacional de Colombia, Vol. 79, nº175, p. 9.
- Cunha, R. (2013) Apostila do Curso de Fundações da Pós-Graduação em Geotecnia, *Universidade de Brasília*. 477 p.
- Décourt, L. (1996) A Ruptura de Fundações Avaliada com Base no Conceito de Rigidez, *Seminário de Engenharia de Fundações*, SEFE III, São Paulo, Brasil, p. 215-224.
- Décourt, L (2008) Fundações Profundas 1. Provas de carga em Estacas podem dizer muito mais do que têm dito, *Seminário de Engenharia de Fundações*, SEFE VI, São Paulo, Brasil, p.20
- Hirany, A. e Kulhawy, F.H. (1989) *Interpretation of Load Tests on Drilled Shafts Part 1: Axial Compression*, Vol 2, ASCE, p. 1132-1149.
- Melo, B. (2009) *Análise de Provas de Carga à Compressão à Luz do Conceito de Rigidez*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 219 p.
- Mendoza, C.C. (2013) *Estudo do Comportamento Mecânico e Numérico de Grupos de Estacas do Tipo Alluvial Anker em Solo Poroso do Distrito Federal*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 234 p.
- Poulos, H.G. e Davis, E.H. (1980) *Pile Foundation Analysis and Design*, Rainbow-Bridge Book , 410 p.
- Van Der Veen (1953) The Bearing capacity of Pile, *Third International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engeneering*, p. 84-90.
- Vianna, A. (2000). *Análise de Provas de Carga Estática em Estacas Pré-Moldadas Cravadas na Cidade de Curitiba e Região Metropolitana*, Disertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, Universidade de São Paulo, 112 p.
- Zuluaga, F.A. (2015) *Estimativa da Capacidade de Carga e Recalque de Fundações Tipo Alluvial Anker no Solo do Distrito Federal*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 108 p.