

Análise do atrito lateral de estaca pré-moldada de concreto através do ensaio pressiométrico

Tomaduci, Fernanda Bezerra

Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, fernanda@damascopenna.com.br

Albuquerque, Paulo José Rocha

Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, pjra@fec.unicamp.br

Carvalho, David

Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, d33c@uol.com.br

RESUMO: O uso do ensaio pressiométrico no Brasil ainda é insipiente, tendo sido utilizado apenas em pesquisas e obras de grande porte, o que contradiz a tendência internacional. Apesar de sua grande utilização fora do Brasil ainda existe uma série de dúvidas a respeito da utilização das correlações existentes na literatura internacional para a estimativa de parâmetros geotécnicos e capacidade de carga, especialmente em solos lateríticos de alta porosidade e em solos não saturados. Este trabalho tem por objetivo apresentar uma avaliação do atrito lateral médio em uma estaca pré-moldada de concreto, de comprimento 14 m e diâmetro igual a 0,18 m, calculado através dos dados obtidos no ensaio Pressiômetro de Ménard, comparando-o com os dados obtidos em prova de carga instrumentada ao longo do fuste. A importância deste trabalho dá-se pela falta de experiência na utilização de ensaios pressiométricos em solos tropicais, resultando na dificuldade em utilizar-se dos fatores obtidos em ensaios, quando comparando-se com os dados que se correlacionam com o comportamento real das obras, tornando-se importante ampliar os estudos no sentido de avançar o conhecimento sobre o ensaio.

PALAVRAS-CHAVE: Pressiômetro de Ménard, Fundações, Estacas pré-moldadas de concreto.

1 INTRODUÇÃO

A determinação da capacidade de carga de uma maneira eficaz e confiável ainda é muito desejada pela comunidade geotécnica de projetos. Muitos métodos buscam parâmetros baseados na teoria da mecânica dos solos e também baseados em ensaios in-situ. Dentre os ensaios de campo pode-se destacar o ensaio pressiométrico, utilizado internacionalmente para determinar parâmetro de cálculo de capacidade de carga de estacas.

No Brasil a técnica ainda é pouco utilizada, pois não se encontra facilmente o equipamento no mercado, devido ao alto custo de importação e à pouca experiência em sua utilização para determinados tipos de solo como os solos

tropicais, não-saturados, porosos e lateríticos. Existe ainda pouca informação disponível na literatura internacional sobre o uso de ensaios pressiométricos em solos desse tipo, particularmente sobre seus parâmetros.

Restam dúvidas a respeito da possibilidade de se utilizar parâmetros de correlações da literatura internacional para ensaios pressiométricos em solos tropicais.

Dessa forma, esse artigo apresenta os resultados de métodos de previsão de carga da parcela de atrito lateral em estaca pré-moldada de concreto utilizando-se parâmetros do pressiômetro de Ménard, e compara-os ao resultado da prova de carga instrumentada, visando concluir sobre a eficácia desses métodos.

2 O ENSAIO PRESSIOMÉTRICO

O ensaio pressiométrico é um ensaio in-situ desenvolvido na França na década de 50, que consiste na inserção de uma sonda pressiométrica em um pré-furo, impondo deformação radial à membrana por meio de injeção de água na célula central e de gás nitrogênio nas células de guarda, determinando diretamente a relação entre as tensões aplicadas segundo variações de pressão e volume ocorridos com a deformação do solo.

A curva de tensão vs deformação do solo prospectado fornece as seguintes informações obtidas diretamente do ensaio: módulo pressiométrico de Ménard, pressão limite de Ménard e a pressão residual.

O equipamento consiste em uma sonda cilíndrica flexível, constituída de uma célula central de medida, alimentada de água e duas células de guarda, mantidas sob pressão com gás, com o propósito de assegurar um campo cilíndrico de esforço sobre a secção central. Além disso, existe um complexo de dispositivos para o controle do volume de água injetada e da pressão de gás, agrupados em um instrumento posicionado na superfície (Bruschi, 2010).

A cada incremento de pressão as leituras do nível de volume são registradas aos 15s, 30s e 60s. Após 60s um novo incremento de pressão é aplicado, tendo como resultado uma curva pressiométrica onde o volume injetado ao final de 60s é plotado em função da pressão aplicada. A pressão limite (p_L) é estimada através das últimas leituras (30s e 60s) do ensaio, e é um dos parâmetros mais importantes do ensaio pressiométrico. Já o módulo pressiométrico é calculado pela leitura das variações de pressão e volume durante o ensaio.

Por ser um ensaio feito em pré-furo é necessária a preparação de um furo de qualidade para garantir a obtenção de um ensaio satisfatório, atendendo-se à recomendação de ter seu diâmetro entre 1,03 e 1,20 vezes o diâmetro da sonda, e ser cravado causando a menor perturbação possível.

3 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA PARCELA DE CARGA POR ATRITO LATERAL EM ESTACAS

A abordagem básica para determinar a parcela de atrito lateral da capacidade total da estaca é correlacionar a pressão lateral unitária (f_s) da estaca com a pressão limite efetiva (p_{L*}). Vários métodos propõem curvas $p_{L*} \times f_s$ para determinação da parcela de carga por atrito q_L (Briaud, 1992).

O método proposto por Ménard em 1963 utiliza o gráfico da figura 1 para obter a parcela f_s para todos os tipos de estaca e todos os tipos de solo (Briaud, 1992).

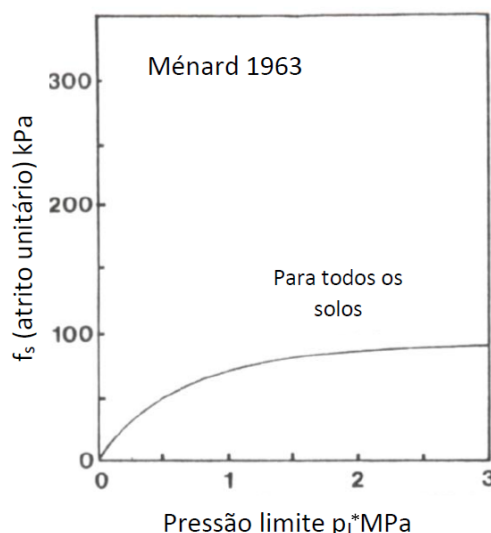


Figura 1: Método de Ménard (Briaud, 1992)

O método proposto por Baguelin et al. (1978) utiliza o gráfico da figura 2 e se difere do método de Ménard por apresentar quatro curvas para serem tomadas, conforme o tipo de solo, o tipo de instalação e o material da estaca, ao invés da curva única do método de Ménard de 1963. Os valores de f_s desse método complementa a curva única de Ménard (Briaud, 1992).

O método de Bustamante e Gianeselli (1981) baseou-se em 186 provas de carga e propõe sete curvas distintas da relação p_{L*} (pressão limite efetiva) $\times f_s$. As curvas são escolhidas a partir do tipo de solo, do tipo material e instalação da estaca, incluindo mais técnicas de instalação de estacas e tipos de solos que o método de Baguelin et al. (1978) citado em Briaud, (1992).

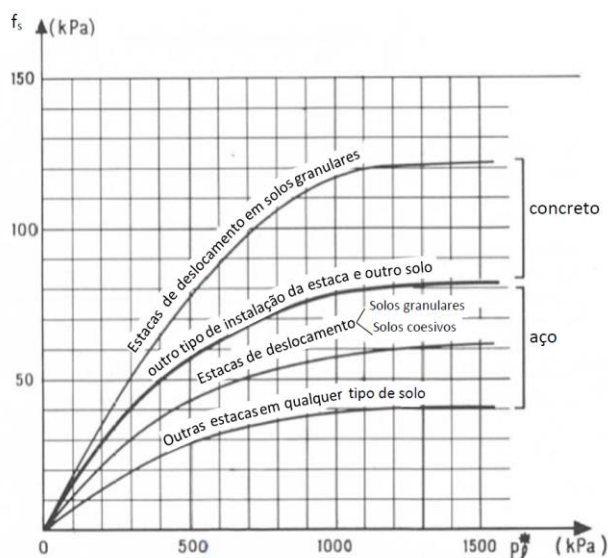


Figura 2: Método de Baguelin et al. (1978)

O método desenvolvido pelo Laboratoire de Ponts et Chaussées na França (LPC) (Bustamante e Gianceselli, 1982) é a evolução do método de Bustamante e Gianceselli (1981). As sete curvas são apresentadas na figura 3 e os valores recomendados para f_s são um tanto menores do que os obtidos pelo método de 1981 (Briaud, 1992).

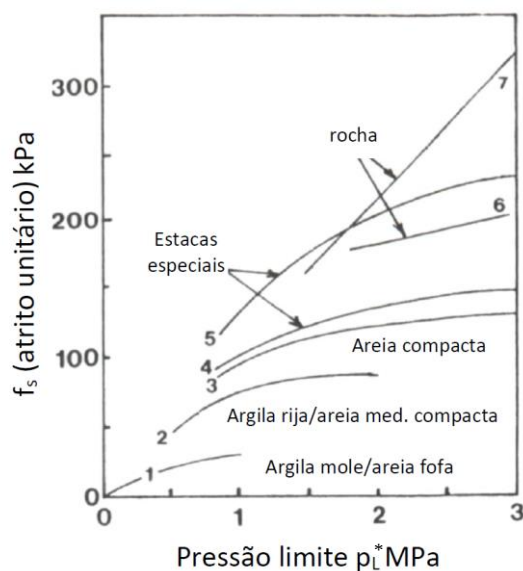


Figura 3: Método LPC de 1982 (Briaud, 1992)

Um dos métodos já descrito no documento oficial Francês é o chamado LCPC, SETRA, de 1985. Clarke, 1995 acrescenta que esse método foi desenvolvido a partir do estudo de 200 estacas instrumentadas e se baseia no tipo de solo, no tipo de estaca e na pressão p_L^* (ou p_{lm} como outros autores apresentam, que é a

pressão limite efetiva) obtida pelo pressômetro. O gráfico desse método está apresentado na figura 4 e na tabela 1, que indica o tipo de solo e o tipo de estaca correspondente a cada curva.

Tabela 01: Tipos de solo e de estaca para o método LCPC-SETRA 1985, (Clarke, 1995)

Tipo de solo	p_L^* (Mpa)	Estaca		
		Escavada	Cravada	
		Concreto	Concreto	Aço
Argila mole	0-0,7	A	A	A
Argila rijá	1,2-2	A, (B)	A, (B)	A
Argila muito rijá	>2	A, (B)	A, (B)	A, (B)
Areia fofa	0-0,7	A	A	A
Areia med. compacta	1-2	B, (C)	B, (C)	B
Areia muito compacta	>2,5	C, (D)	C, (D)	C
Cal completamente alterado	0-0,7	A	A	A
Cal parcialmente alterado	>1	C, (D)	C, (D)	C
Marga	1,5-4	D, (F)	F	F
Marga rijá	>4,5	F		
Rocha alterada	2,5-4	G	G	G
Rocha fraturada	>4,5	G		

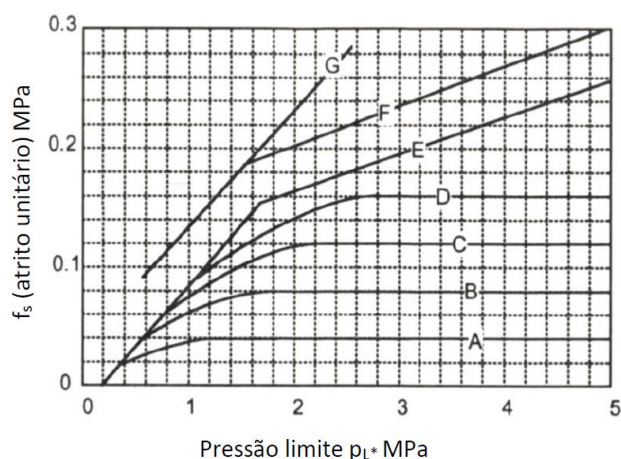


Figura 4: Método SETRA-LCPC 1985 (Clarke, 1995)

Tabela 2: Tipos de estaca para o método do fascículo 62-V (Bustamante, et al., 2009)

Descrição da estaca	Nº da estaca	Argila	Areia, pedra
Estaca ou barrete escavada a seco	1	Q2	Q2*
Estaca ou barrete escavada com lama estabilizante	2	Q2	Q2
Estaca escavada com camisa perdida	3	Q1	Q1
Estaca escavada com camisa recuperável	4	Q1	Q2
Estacas escavadas a seco ou com lama estabilizante	5	Q3	Q3*
Estacas escavadas com simples ou dupla rotação	6	Q2	Q4
Estaca helicoidal	7	Q3	Q5
Estaca helicoidal com camisa	8	Q1	Q2
Estacas cravadas de concreto Pré-fabricadas ou protendidas	9	Q3	Q3**
Estaca revestida cravada (concreto, groute e argamassa)	10	Q6	Q8
Estaca Franki	11	Q2	Q3
Estaca de aço cravada com ponta fechada	12	Q2	Q2**
Estaca de aço cravada com ponta aberta	13	Q2	Q1
Estaca cravada em H	14	Q2	Q2
Estaca cravada grouteada H	15	Q6	Q8
Estacas prancha cravadas	16	Q2	Q2
Microestacas tipo 1	17	Q1	Q1
Microestacas tipo 2	18	Q1	Q1
Microestacas SGP	19	Q6	Q8
Microestacas MRP	20	Q9	Q9

Desde o início dos anos 1990, quando o novo código francês de práticas de fundação (M.E.L.T., 1993) conhecido como “fascicule 62-V” foi publicado (Bustamante & Gianceselli, 1999), dados experimentais adicionais foram coletados pelo LCPC a fim de incluir novos métodos de instalação das estacas e assim refinar ainda mais os valores de pressão unitária lateral f_s e da carga de ponta (Bustamante et al., 2009). As novas estacas, ensaiadas até a ruptura, geraram o conteúdo da tabela 2 (ao lado) que mostra os tipos de estaca, os tipos de solo e indica o nome da curva que deverá ser consultada no gráfico do método, apresentado na figura 05 (Bustamante, et al., 2009).

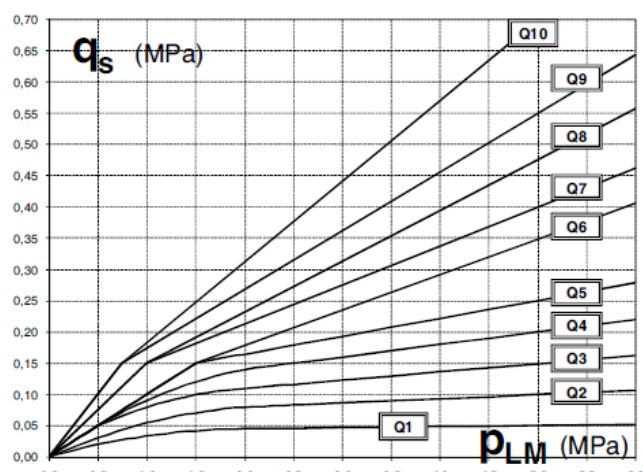


Figura 5: Gráfico para determinação da carga unitária q_s do método do fascículo 62-V (Bustamante, et al., 2009)

4 CAMPO EXPERIMENTAL

O ensaio pressiométrico e a prova de carga foram executados no Campo Experimental I da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) localizado na cidade de Campinas, SP. O subsolo local é caracterizado por uma camada de 6 m de espessura de argila siltosa, porosa e laterítica, seguida uma camada até 18 m de profundidade de silte argiloso (solo residual). O nível d'água não foi encontrado até 17 m de profundidade. A primeira camada apresenta valores médios de $N_{spt} = 4$ e $f_s = 28$ kPa; enquanto que a segunda camada apresenta valores médios de $N_{spt} = 8$ e $f_s = 123$ kPa.

Vários ensaios de campo e laboratório foram realizados no local (SPT-T, CPT, DMT, Cross Hole etc), além do ensaio pressiométrico de Ménard. Neste artigo, serão apresentados os resultados dos ensaios do ponto PMT-03, que está localizado aproximadamente a 5,5 m da estaca a ser estudada.

A figura 06 mostra a locação do ensaio da estaca no campo experimental. A figura 07 mostra o gráfico produzido com os dados obtidos no ensaio PMT-03.

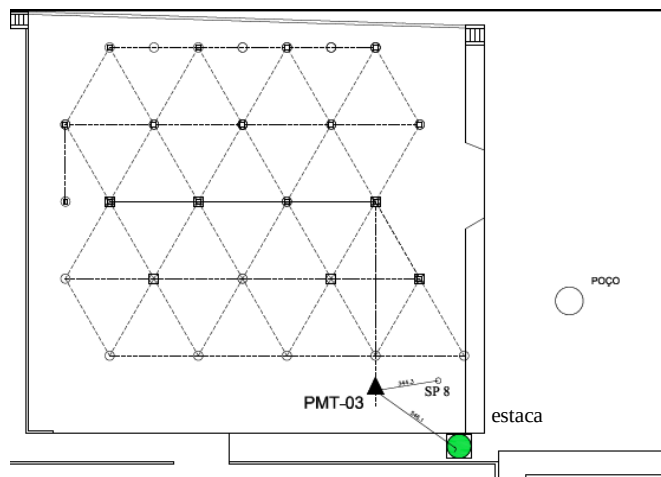


Figura 6: Croquis de localização do ensaio pressiométrico e da estaca pré-moldada

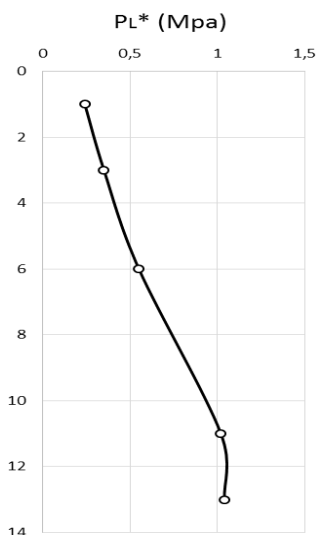


Figura 7: Resultados de p_L^* para o ensaio PMT-03

Os ensaios foram realizados nas profundidades de 1,0m, 3,0m, 6,0m, 9,0m, 11,0m e 13,0m. As pressões limites utilizadas foram crescentes (variando de 20 kPa a 120 kPa) de acordo com a profundidade do ensaio. A campanha de investigação foi executada em

agosto de 2015. Apresenta-se na figura 7 os resultados de p_L^* obtidos nas profundidades ensaiadas.

5 ANÁLISES E RESULTADOS

A estaca pré-moldada estudada, de comprimento 18 m e diâmetro 0,18 m, foi instrumentada em profundidade. A instrumentação foi composta por extensômetros elétricos colados às barras de aço, instalados em três níveis ao longo do fuste da estaca: secção de referência (0,5m), 10m e 14m de profundidade. A estaca foi submetida a uma prova de carga do tipo lenta, com incrementos de 40 kN; a carga que caracterizou a ruptura geotécnica foi de 262 kN com um recalque máximo de 54,13 mm. Por meio da instrumentação ao longo do fuste, foi possível separar as cargas lateral e ponta, o que indicou que 84 % da carga aplicada no topo da estaca foi absorvida pelo atrito lateral, representando um valor aproximado de 220 kN.

Foi possível determinar um valor de f_s para cada profundidade ensaiada no ponto PMT-03, nas profundidades de 1m, 3m, 6m, 11m e 13m, para cada método apresentado anteriormente. Os valores obtidos são apresentados graficamente nas figuras 08, 09, 10, 11 e 12.

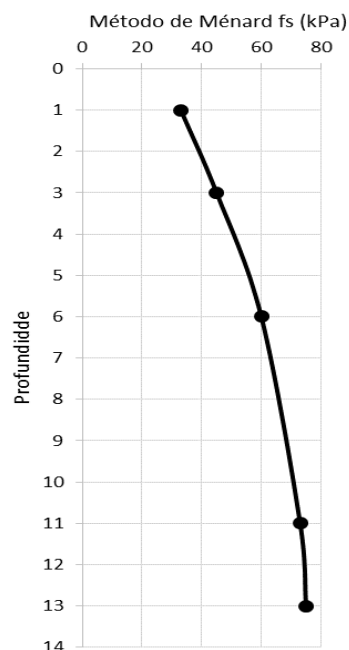


Figura 8: Valores de f_s para o método de Ménard, 1963 (Briaud, 1992)

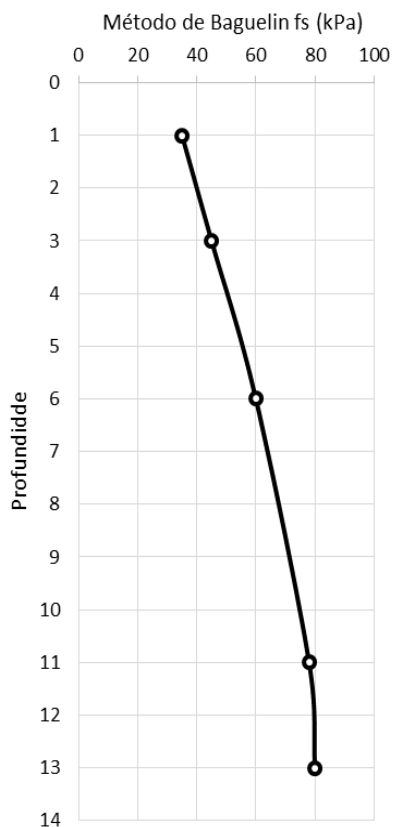


Figura 9: Valores de f_s para o método de Baguelin et al., 1978 (Baguelin et al. 1978)

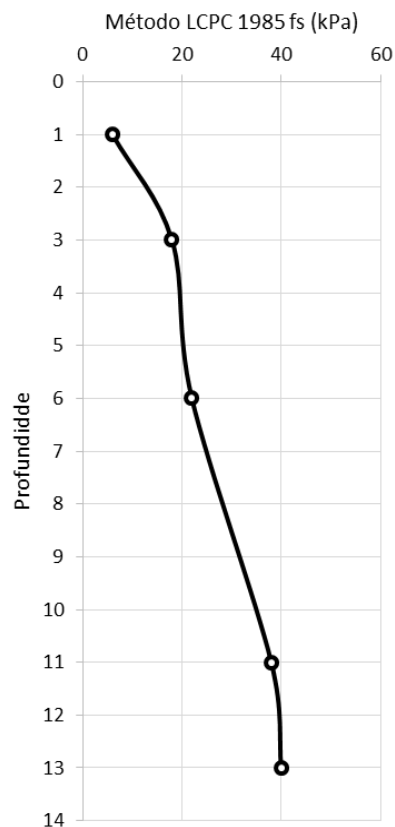


Figura 11: Valores de f_s para o método SETRA-LCPC, 1985 (Clarke, 1995)

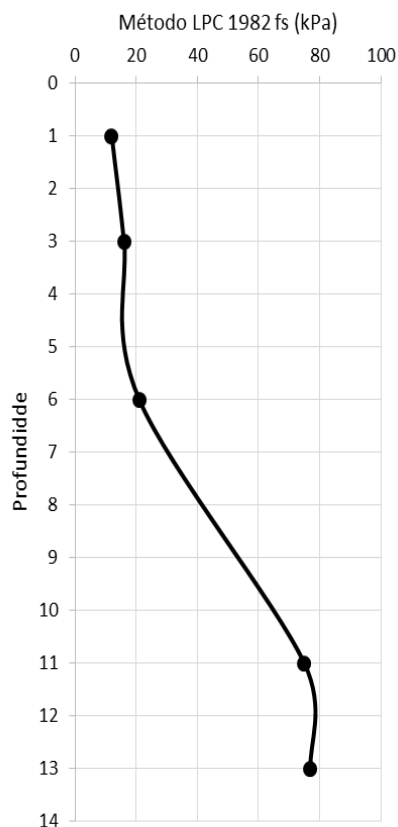


Figura 10: Valores de f_s para o LPC, 1982 (Briaud, 1992)

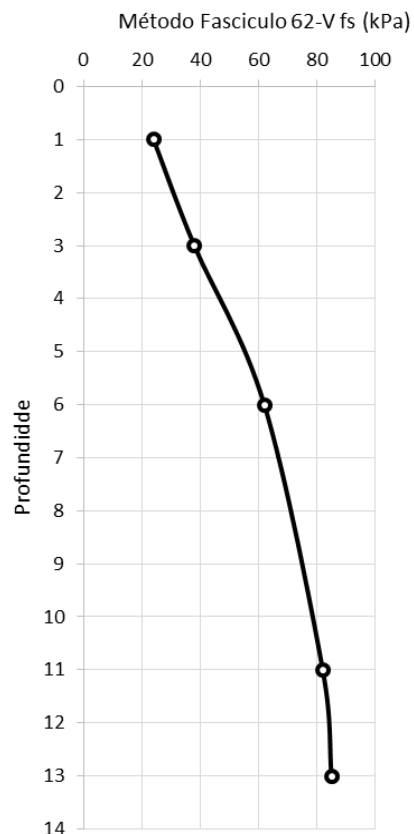


Figura 12: Valores de f_s para o método Fascículo 62-V, 1999 (Bustamante, et al., 2009)

Os valores de f_s foram obtidos utilizando-se os valores de p_{L^*} obtidos para cada profundidade do ensaio. Conhecendo-se os valores de p_{L^*} , o tipo de solo em cada profundidade e o tipo de estaca, foi possível gerar a tabela 3:

Tabela 3: Valor de f_s , obtido por ensaio, para cada método analisado

prof (m)	f_s (kPa) - métodos				Fascículo 62-V (1999)
	Ménard (1963)	Baguelin (1978)	LPC (1982)	LCPC (1985)	
1	33	35	12	6	24
3	45	45	16	18	38
6	60	60	21	22	62
11	73	78	75	38	82
13	75	80	77	40	85

Tabela 4: Parcela de carga por atrito lateral q_L

prof. (m)	q_L (kN) - métodos				Fascículo 62-V (1999)
	Ménard (1963)	Baguelin (1978)	LPC (1982)	LCPC (1985)	
1	18,66	19,79	6,79	3,39	13,57
2	22,05	22,62	7,92	7,07	17,53
3	25,45	25,45	9,05	10,18	21,49
4	28,84	28,27	9,61	11,20	26,01
5	31,67	31,10	10,18	11,59	31,10
6	33,93	33,93	11,88	12,44	35,06
7	35,63	36,19	16,96	14,14	37,89
8	37,32	38,45	23,19	15,83	40,15
9	38,45	40,72	30,54	17,47	42,41
10	40,15	42,41	36,76	20,36	44,67
11	41,28	44,11	42,41	21,49	46,37
12	41,85	44,67	43,54	22,62	47,50
13	42,41	45,24	43,54	22,62	48,07
14	42,41	45,24	43,54	22,62	48,07
Soma (Q_L)	480,10	498,19	335,90	213,02	499,89

A tabela 4 mostra os resultados de q_L , que representa a carga por atrito lateral para cada metro de estaca, sendo obtido com a multiplicação de f_s (determinado pelos métodos analisados) pelo perímetro da seção transversal da estaca, em cada metro da profundidade da estaca. Como os ensaios forneceram apenas medidas nas profundidades 1, 3, 6, 11 e 13,

gerou-se um gráfico de f_s com esses valores e interpolou-se os demais valores de f_s para todas as profundidades da estaca, até os 14 m de profundidade. A somatória de q_L , então, representa a carga lateral total calculada para cada método, interpretada por Q_L .

A figura 13 compara os resultados obtidos para Q_L pelos cinco métodos de cálculo avaliados, com o valor da parcela de atrito lateral da carga de ruptura da estaca obtida na prova de carga.

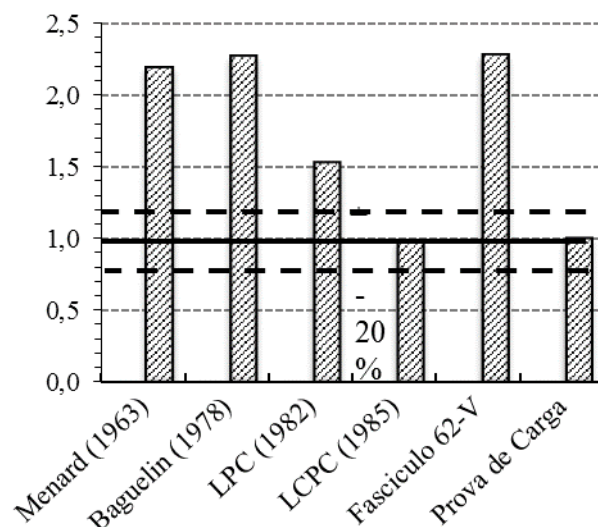


Figura 13: Apresentação dos valores de Q_L obtidas com os métodos de cálculo e a carga Q_L obtida na prova de carga

6 CONCLUSÕES

Avaliando os resultados e considerando-se os valores obtidos entre a faixa de $\pm 20\%$ daquele obtido pela prova de carga como aceitos, verificou-se que os métodos de Baguelin et al. (1978), Ménard (1963) e do Fascículo 62 – V de 1999, resultaram em valores superiores ao obtido pela prova de carga. Os métodos do LPC (Bustamante e Ganeselli, 1982), que é a evolução do método de Bustamante e Ganeselli de 1981, e LCPC (1985) apresentaram valores próximos à prova de carga.

O método de Ménard, 1963 utiliza apenas uma curva, não diferenciando tipo de estaca nem tipo de solo, e resultou num valor cerca de 2,18 vezes maior que o resultado da prova de carga, mostrando-se dimensionado contra a segurança.

O método de Baguelin et al. de 1978 evoluiu do método de Ménard de 1963 e adicionou 4 curvas, diferenciando material e instalação da estaca e tipos de solo, e obteve um resultado cerca de 2,26 vezes maior que a prova de carga, mostrando-se também dimensionado contra a segurança, com valor distante da faixa de 20% de aceitação dos resultados.

O método LPC de 1982 apresenta 7 curvas em seu método, pois também provém de evoluções de métodos anteriores. Esse método considera o tipo de solo e sua compactidade e também estacas chamadas de especiais, mas não difere o tipo de instalação e material da estaca. O valor de carga obtido por esse método é cerca de 1,53 vezes maior que o obtido na prova de carga e ultrapassa o limite de 20% de aceitação, mostrando-se dimensionado contra a segurança.

O método LCPC-SETRA 1985 admite diferentes tipos de solo, diferentes métodos de execução das estacas e seus materiais, criando 7 curvas em seu ábaco. Também aponta valores para p_{1*} correlacionando-os com o tipo de solo. O valor para a carga lateral obtido nesse método é cerca de 0,97 vezes o da prova de carga, se enquadrando nos 20% de variação aceitos, mostrando-se adequado ao dimensionamento da parcela de carga por atrito lateral para a estaca pré-moldada de concreto analisada, implantada em solos porosos, não-saturados lateríticos.

O método apresentado como fascículo 62-V de 1999 (Bustamante, et al., 2009) foi desenvolvido após instrumentar muitas estacas, de variados tipos. As curvas do ábaco nesse métodos diferem o tipo de estaca, quanto à sua execução e materiais, bem como o tipo de solo, porém seu resultado nessa análise aponta um valor cerca de 2,27 vezes maior que a prova de carga, indicando um dimensionamento contra a segurança e constando fora da faixa de 20% de aceitação do resultado.

Dessa forma, o resultado obtido com o método de 1985, LCPC-SETRA, que está indicado em Briaud, 1992 retornou bons resultados, dentro da faixa de 20% de discrepância em relação à prova de carga executada, com um valor muito parecido à esse resultado. Porém é válido ressaltar que em

1992, ano dessa publicação, ainda não havia sido finalizado o método do fascículo 62-V, que foi concluído em 1999.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Damasco Penna Engenharia Geotécnica pela realização do ensaio pressiométrico no Campo Experimental da Unicamp e a Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp pela disponibilidade do local dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- ISSO/DIS 22476-4 – Geotechnical investigation and testing – field testing – part 4: Ménard pressuremeter test, 2009, 53p.
- Baguelin, f.; Jézéquel, J.F. & Shields, d.h. (1978) – *The pressuremeter and foundation engineering*. Trans Tech Publications. Clausthal, Germany, 614p.
- Briaud, J.L. (1992) – *The pressuremeter*. Trans tech publications, A.A. Balkeua, Rotterdam, 322p.
- Bruschi, A. (2010) - *Prove geotecniche in situ – guida alla stima delle proprietà geotecniche e alla loro applicazione alle fondazioni*. Dario Flaccovio Editore, Palermo, 665p.
- Bustamante, M. & Ganeselli, L. (1981) – *Prevision de la capacite portante des pieux isole, sous charge verticale: regles pressiometriques e penetrometrique*. Bull Liaison Labo P et Ch. Maio-Junho, 1981.
- Bustamante, M., Gambin, M, Ganeselli, L. (2009) – Pile design at failure using the Ménard pressuremeter: an up-date. Contemporary topics in in-situ testing, analysis and reliability of foundations. *International Foundation Congress & Equipment Expo 2009*, IFCEE'09, Orlando, nº 186.
- Cavalcante, E. H. et. al (2006) – Campos experimentais Brasileiros. *XIII Cobramseg – congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica*, Curitiba, Brasil.
- Clarke, B.G. (1995) – *Pressuremeter in geotechnical design*. Chapman & Hall, Cambridge, Grã-Bretanha, 364p.