

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Um Critério para Controle da Perfuração de Estacas Raiz em Rochas Sedimentares

Francisco de Rezende Lopes

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, flopes@coc.ufrj.br

Roney de Moura Gomes

GroundTech Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, roney@groundtech.com.br

Geraldo Guedes de Andrade

ACRUX Consultoria e Engenharia, São Paulo, Brasil, geraldo.andrade@acruxconsultoria.com.br

RESUMO: A geração de energia elétrica via turbinas eólicas é uma alternativa em expansão no Brasil, e o litoral do Nordeste é uma das regiões de maior potencial. Por outro lado, as pás das turbinas – e consequentemente as alturas das torres – estão crescendo de tamanho, o que cria um desafio para a Engenharia de Fundações. O trabalho descreve a execução de estacas tipo raiz, perfuradas em rochas sedimentares, para fundação de torres eólicas de um parque no Rio Grande do Norte. A solução de fundação para as torres consistiu em 20 estacas do tipo raiz, num arranjo em anel e ligeiramente inclinadas, convergindo para o nível da turbina. Esse arranjo confere grande rigidez horizontal e rotacional às torres. As estacas foram executadas por processo rotativo na parte superior, com diâmetro 41 cm, e por processo percussivo (martelo de fundo) no trecho em rocha, com diâmetro 31 cm. Foram realizadas sondagens e percussão e mistas (percussão e rotativa) em todas as bases. Como havia diferenças significativas de perfil geotécnico entre torres, e mesmo em uma mesma torre, buscou-se definir um critério para a profundidade das estacas baseado na resposta à perfuração. Escolheu-se o tempo de atuação do martelo como critério para paralização da perfuração em rocha. O critério foi testado em um local de perfil mais homogêneo, em que havia apenas arenito (abaixo da areia fofa superficial). E foi feita a confirmação da adequabilidade do comprimento perfurado (pino em rocha) por provas de carga estática. O critério foi aplicado, então, no restante da obra, comprovando-se posteriormente com mais provas de carga.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações de Torres Eólicas, Estacas Raiz, Rochas Sedimentares, Fundações em estacas, Estacas em Rocha.

ABSTRACT: Electricity generation via wind turbines is an expanding alternative in Brazil, and the Northeast coast is one of the regions with the greatest potential. On the other hand, the turbine blades - and consequently the heights of the towers - are growing in size, which poses a challenge to Foundation Engineering. The paper describes the installation of root piles (or micro piles), drilled in sedimentary rocks, for the foundation of wind power generators in the state of Rio Grande do Norte. The foundation solution for the towers consisted of 20 root piles, in a ring arrangement and slightly inclined, converging to the level of the turbine. This arrangement confers a high horizontal and rotational rigidity to the towers. The piles were installed by a rotary process in the upper part, with a diameter of 41 cm (16”), and by a percussion process (with down-the-hole DTH hammer) when rock was encountered, with a diameter of 31 cm (12”). SPT and mixed (percussion and rotary) borings were available at all bases. As there were significant differences in the geotechnical profile between towers, and even within a tower, a criterion to define the depth of the piles – based on the response to drilling – was sought. The time of hammer action was chosen as the criterion to end rock drilling. The criterion was tested in a location with a more homogeneous profile, where there was only sandstone (below the loose top sand). And the adequacy of the drilled length (rock socket) was verified by static load tests. The criterion was, then, applied to the rest of the work, with further checks by load tests.

KEYWORDS: Wind Tower Foundations, Micro piles, Sedimentary Rocks, Pile Foundations, Pile rock socket.

1 Introdução

O trabalho apresenta resultados da execução de estacas tipo raiz perfuradas em rochas sedimentares, destinadas a fundação de 102 torres de um parque eólico no Rio Grande do Norte, em 2011. A solução de fundação adotada consistiu em 20 estacas do tipo raiz por torre, subverticais, executadas com auxílio de martelo de fundo.

O subsolo do parque eólico consiste tipicamente de areia superficial de baixa compactidade (sedimentos eólicos), seguida de intercalações de rochas sedimentares alteradas, com predominância de arenitos. Como havia grande variabilidade na estratigrafia e no grau de intemperismo, fez-se necessário estabelecer um critério para definição da profundidade das estacas. O trabalho descreve o critério adotado para perfuração das estacas raiz, e apresenta alguns resultados típicos de provas de carga estática (PCEs).

2 A Obra

A obra em questão é um grande parque eólico localizado no litoral do Rio Grande do Norte, com um total de 106 torres. Cada torre era constituída de um bloco de fundação, com estacas, uma coluna de aço e, no topo, geradores da General Eletric para 1.600 kW, com hélices de 100 m de diâmetro.

Projeto de fundações

O projeto das fundações precisava atender não só aos usuais critérios estáticos, mas também a critérios dinâmicos. Para atender a esses critérios as fundações precisavam ter grandes rizejas horizontal e à rotação. Para garantir essas rizejas, concebeu-se a fundação em estacas com inclinação tal que seus prolongamentos convergissem ao ponto de aplicação da principal força horizontal: o gerador. O resultado foi um arranjo de 20 estacas do tipo raiz, inclinadas de 5°. O bloco de fundação está indicado na Figura 1. Um perfil esquemático da torre e do bloco de fundação consta da Figura 2.

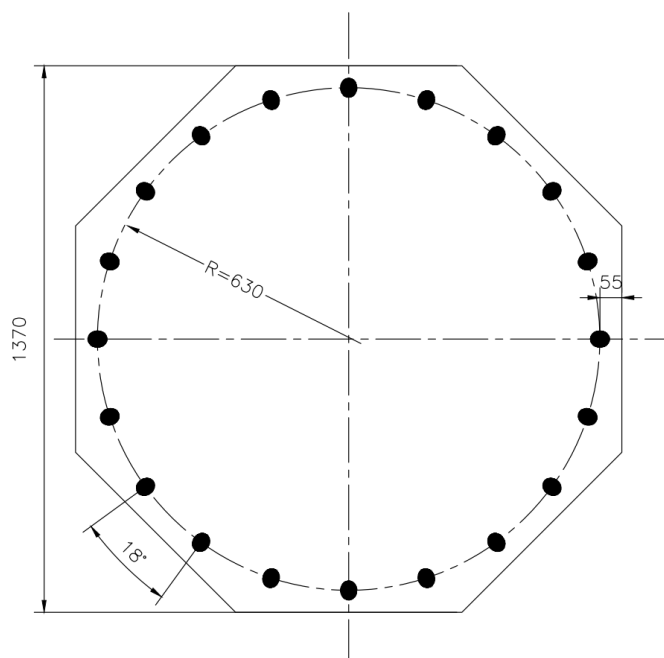


Figura 2. Locação das estacas no bloco de fundação (medidas em cm).

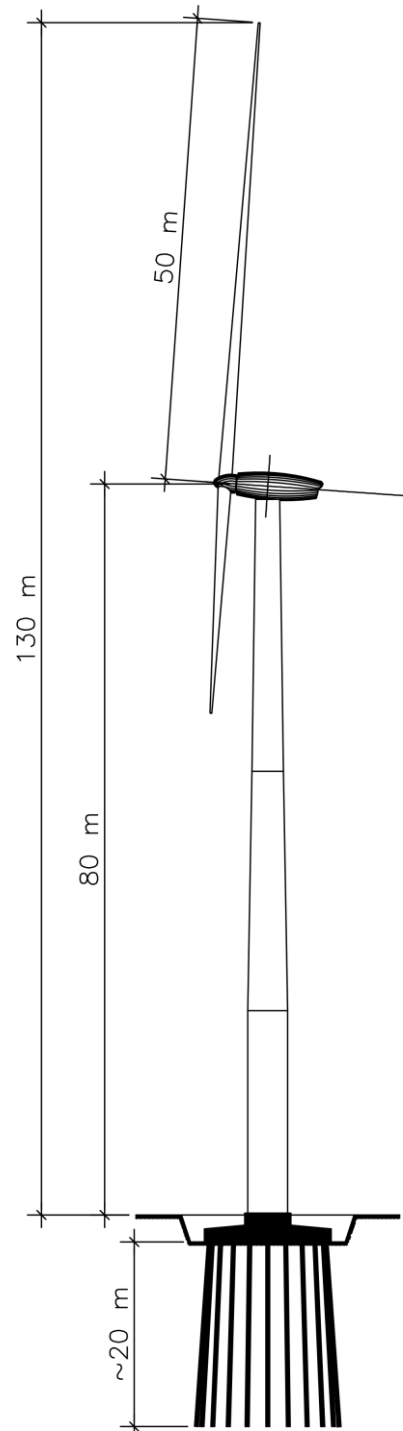


Figura 2. Perfil da torre eólica e sua fundação.

As estacas raiz foram definidas com diâmetro 41 cm para carga axial de serviço de 1600 kN. Dadas as condições do subsolo, que incluíam a presença de rochas, foi prevista a execução de parte do comprimento das estacas com martelo de fundo, com redução de diâmetro para 31 cm (12”), conforme será descrito adiante.

Uma fotografia da base do bloco com as estacas já executadas e arrasadas é mostrada na Figura 3.



Figura 3. Base com as estacas raiz executadas e arrasadas (em preparação para concreto magro).

3 Subsolo Local

O subsolo local é bastante variado, com a ocorrência de areias de baixa compactidade (sedimentos eólicos), com até 10 m de espessura, sobrejacentes a intercalações de areias compactas e rochas sedimentares alteradas, com predominância de arenitos, mas também de calcários e conglomerados (cascalho laterítico). Embora a gênese do subsolo fosse comum, a sequência de rochas sedimentares e seu grau de intemperismo variava consideravelmente entre as torres, conforme ilustrado na Figura 4.

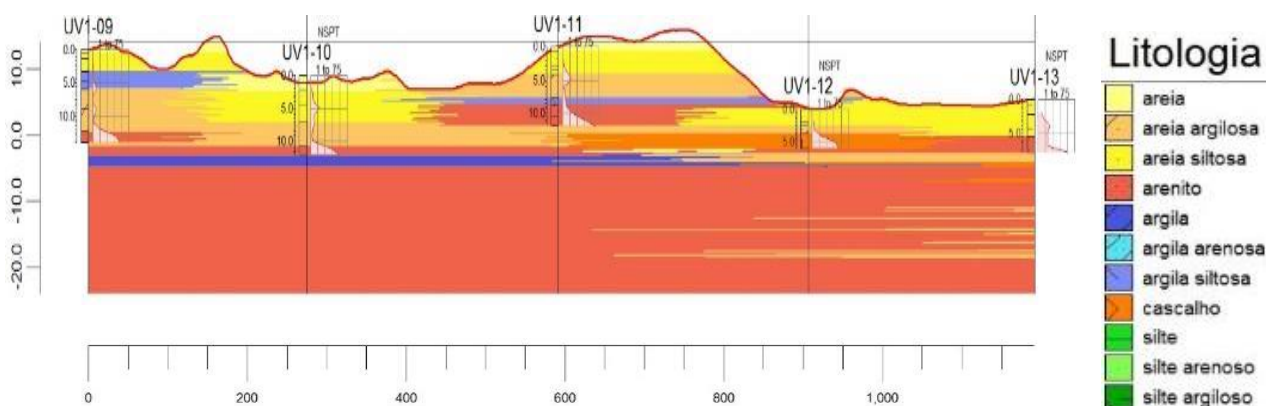


Figura 4. Perfil geotécnico passando por 5 bases.

Se dispunha de pelo menos uma sondagem mista no centro de cada base, e, em alguns casos, de até 3 sondagens por base. O comprimento mínimo para as sondagens mistas foi de 20 m, e o critério recomendado para paralização das sondagens rotativas foi uma penetração de:

- (i) 3,0 m de rocha de boa qualidade, caracterizada por um RQD de 80%, ou,
- (ii) 6,0 m de rocha com qualquer RQD.

Um perfil típico de sondagem consta da Figura 5.

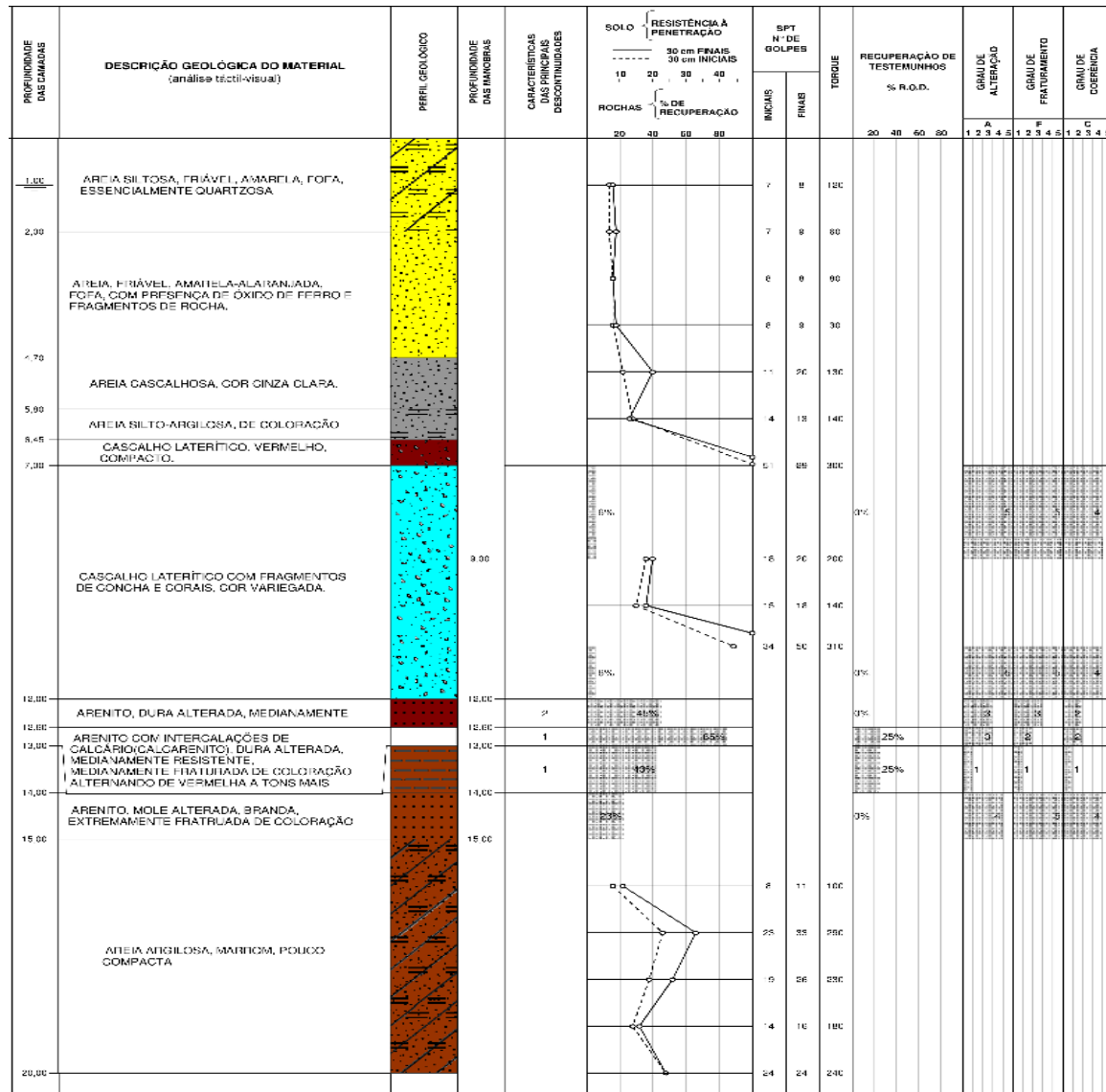


Figura 5. Perfil de sondagem típico da obra.

4 Critério para Definição de Profundidade

4.1 Método executivo

Dadas as condições do subsolo, as estacas foram executadas por processo rotativo na parte superior, com diâmetro 41 cm, e por processo percussivo (martelo de fundo) no trecho em rocha, com diâmetro final mínimo de 31 cm (12"). O método executivo das estacas seguia as seguintes etapas:

- (1) Início da perfuração com revestimento até se encontrar o topo da rocha sedimentar (arenito), a seco, com remoção de detritos por ar comprimido;
- (2) Introdução de um tricone de 12" para iniciar a perfuração no arenito até onde possível;
- (3) Introdução de martelo de fundo com coroa para rocha (*rock-bit*) de 12";
- (4) Deixar o martelo trabalhar por um tempo definido, perfurando o comprimento que fosse possível nesse tempo;
- (5) Introdução de armadura e preenchimento com argamassa (fluida).

O adensamento da argamassa foi feito com auxílio de golpes de ar comprimido.

Embora seja usual se adotar um martelo de 10” para um rock-bit de 12”, essa composição frequentemente ficava presa no furo, perdendo-se produtividade até que se conseguisse retirá-la do furo. Assim, adotou-se um martelo de 8” com bit de 12”. Os martelos de fundo eram da marca PUMA, modelo SD 8, fabricado pela Drillco Tolls, Chile, mostrado na Figura 6. O conjunto martelo-bit pesava 255 kg. O compressor de ar trabalhava com 1.400 psi (libras por pol. quadrada) ou 10 bar de pressão

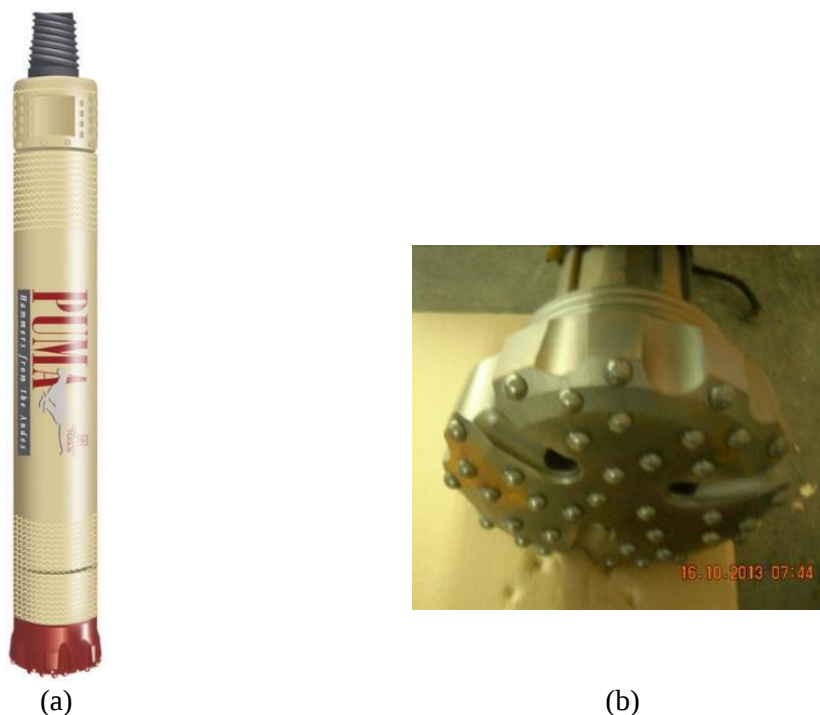


Figura 6. (a) Conjunto martelo-bit e (b) detalhe do rock-bit.

4.2 Definição de critério de paralização da perfuração

Como havia diferenças significativas no perfil geotécnico entre torres, e intercalações de solos e rochas, algumas muito alteradas, a definição do comprimento das estacas por métodos semiempíricos baseados nas sondagens poderia não ser realista e econômica. Somava-se a isso ao fato de as rochas locais serem brandas e fáceis de se perfurar com o martelo de fundo. Fez-se necessário, então, estabelecer um critério para paralização da perfuração baseado em dados da execução.

Decidiu-se executar as primeiras estacas da obra em locais de perfil geotécnico mais simples, com apenas uma camada contínua de arenito (abaixo da areia fofa superficial), para os quais se tinha uma previsão da profundidade de embutimento em rocha. A previsão foi feita considerando-se apenas o atrito lateral, como é comum em estacas esbeltas em rocha (p. ex., Juvencio *et al.*, 2017). O atrito lateral unitário, τ_{ult} , foi estimado a partir da expressão:

$$\frac{\tau_{ult}}{p_{atm}} \cong \alpha \left(\frac{q_u}{p_{atm}} \right)^\beta \quad (1)$$

onde q_u é a resistência à compressão da rocha, p_{atm} a pressão atmosférica, e α e β são coeficientes empíricos. Para a Eq. 1 em MPa, encontram-se valores de α na faixa 0,2-0,8 (limite superior para paredes da perfuração com forte rugosidade/ranhas) e de β na faixa 0,6-0,8 (p. ex., Horvath e Kenney, 1979). O arenito local, de acordo com as sondagens, se apresentava brando, muito alterado, RQD ~ 20%, e teve sua resistência à

compressão estimada em 3 MPa (considerando que os arenitos na região tipicamente não ultrapassam 10 MPa). Com $\alpha = 0,3$ e $\beta = 0,7$, chega-se a $\tau_{ult} \sim 0,3$ MPa e, daí, a um comprimento do pino em rocha de aproximadamente 11 m.

As primeiras estacas tinham boletins de execução detalhados e foram submetidas a provas de carga estática (PCEs). Nos boletins eram registrados os comprimentos dos trechos em processo rotativo (em solo) e percussivo (rocha), bem como o tempo de atuação do martelo de fundo (trecho em rocha). Observou-se que, para atingir a profundidade prevista, o tempo de atuação do martelo era tipicamente de 50 minutos. Esse parâmetro – tempo de martelo – foi, então, escolhido como critério para paralização da perfuração em rocha. Uma vez que as PCEs indicaram resultados satisfatórios e que todos os martelos usados na obra eram iguais, tal critério passou a ser exigido nas estacas restantes, executadas em perfis mais heterogêneos. Os comprimentos dos trechos em rocha variaram, tipicamente, entre 10 e 16 m (comprimentos totais típicos entre 19 e 22 m). Um comprimento total mínimo de 19 m foi também exigido, correspondente à espessura típica de 8 m de areias fofas encontrada na obra, somada a 11 m de pino em rocha típico conforme previsão acima.

Este estudo está baseado na perfuração a seco, empregando ar-comprimado, como é comum no uso de martelo de fundo. A utilização de fluidos, como a água, poderá conduzir a resultados diferentes pois ter-se-iam outras velocidades de avanço da perfuração.

Vale observar que um critério de controle de execução de estacas raiz perfuradas por processo rotativo (não martelo de fundo) foi apresentado por MONTEIRO et al. (2019), em que a capacidade de carga da estaca foi correlacionada com a velocidade de perfuração da estaca e com a velocidade linear da broca.

4.3 Confirmação do critério de paralização da perfuração

As primeiras verificações da capacidade de carga das estacas foram feitas com provas de carga estática (ver montagem típica na Figura 7). Resultados típicos de PCEs – carregamento lento – constam da Figura 8. As estacas cujos resultados são mostrados têm entre 20 e 21 m de comprimento. Os recalques em serviço (carga de 1600 kN) ficaram entre 4 e 6 mm, atendendo a requisitos de rigidez axial. O Fator de Segurança se mostrou satisfatório, e os deslocamentos após descarregamento (residuais) ficaram entre 2 e 6 mm, confirmando o bom desempenho das estacas.

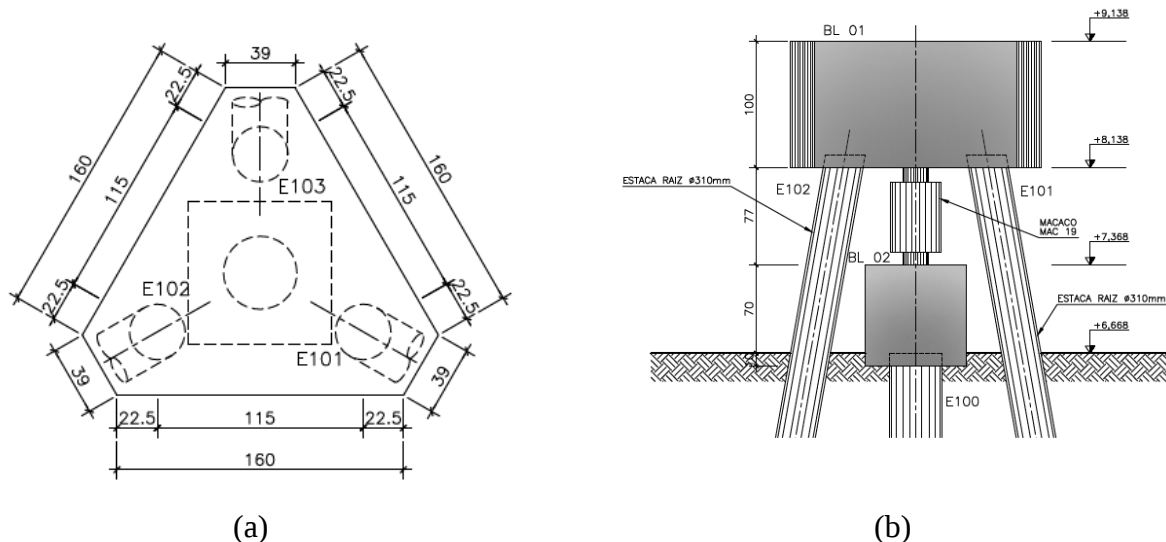


Figura 7. Montagem de prova de carga estática: (a) planta e (b) perfil.

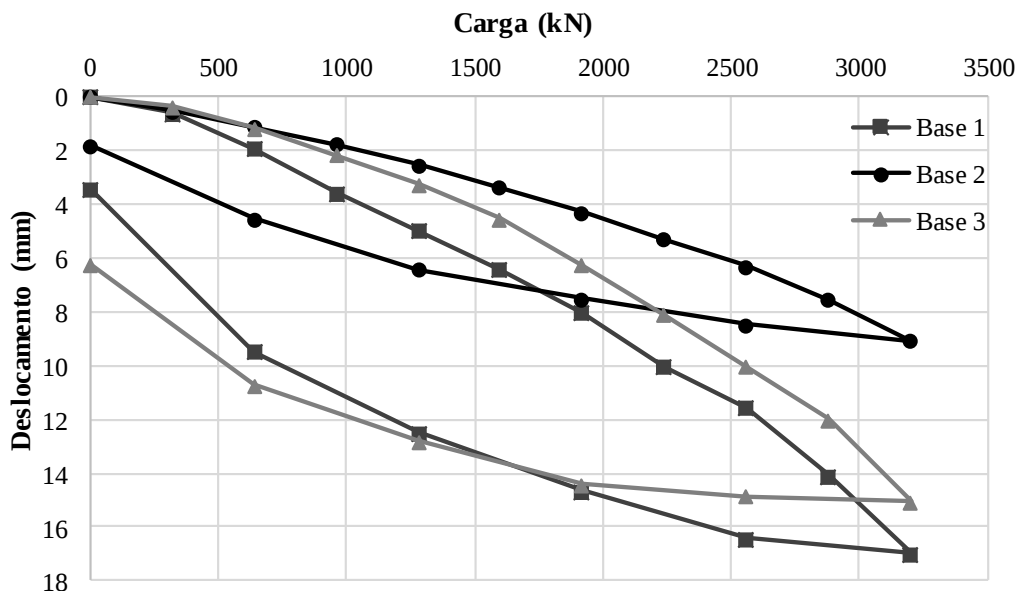


Figura 8. Curvas carga vs. recalque para 3 estacas ensaiadas.

5 Conclusões

O trabalho discutiu um critério para paralização da perfuração de estacas raiz em rochas brandas em uma obra com subsolo muito variado. A escolha de um comprimento único, ainda que por torre eólica, poderia levar a estacas com capacidade de carga acima e abaixo da necessária. Numa obra deste tipo – porém com *estacas cravadas a percussão* – se adotaria um critério para paralização das estacas baseado em *nega*. Pensou-se, então, em um critério análogo, que foi escolhido como o tempo de atuação do martelo de fundo (lembrando que todos os martelos na obra eram iguais). Foram feitas perfurações preliminares em locais de perfil mais homogêneo (onde se tinha uma previsão de comprimento do pino em rocha) com tempo de execução registrado, e confirmada a adequabilidade das estacas por provas de carga estática (PCEs). A adoção de um dado tempo de martelo acabou por produzir comprimentos em rocha diferentes, mas com capacidades de carga semelhantes. Uma série de PCEs complementares confirmaram que as estacas da obra tinham comportamento em serviço (rigidez axial) e capacidade de carga adequados.

AGRADECIMENTOS

A obra foi executada pela SERVENG-CIVILSAN e o projeto ficou a cargo da PORTANTE Engenharia. A firma GEOVOXEL Consultoria em Engenharia fez a consolidação das investigações geotécnicas. As fundações em estacas foram executadas pela TECNOGEO e os ensaios realizados pela RINCENT BTP Brasil. Os dois autores seniores do presente trabalho atuaram como consultores geotécnicos. O terceiro autor era, na época da obra, Diretor Técnico da TECNOGEO. Os autores agradecem às firmas citadas a oportunidade de participarem dessa obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Juvêncio, E.L., Lopes, F.R., e Nunes, A.L.L.S. (2017). An evaluation of the shaft resistance of piles embedded in gneissic rock, *Soils and Rocks*, vol. 40, no.1, pp. 61-74.
- Horvath, R.G., e Kenney, T.C. (1979). Shaft resistance of rock-socketed drilled piers. In: F.M. Fuller, ed., *ASCE Symposium on Deep Foundations*, Atlanta. New York, pp. 182-214.
- Monteiro, F.F., Moura, A.S., e Aguiar, M.F.P. (2019). An alternative approach to the executive control of root piles, *Soils and Rocks*, vol. 42, no.3, pp. 289-299.