

ESTACAS INJETADAS AUTOPERFURANTES EM FUNDAÇÕES DE AEROGERADORES: EXECUÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EM UM SOLO COM BAIXA RESISTÊNCIA NO ESTADO DO CEARÁ

Autores [Maria G. Rocha Oliveira¹]

¹ Engenheira Civil no Grupo Cortez

Email¹: mariarocha@cortezengenharia.com.br

RESUMO

A pesquisa teve como objetivo investigar uma solução técnica para as fundações de aerogeradores situados na costa brasileira. A estaca Alluvial Anker® é uma técnica inovadora de execução de fundações por estacas, ainda pouco conhecida no mercado da construção civil. No entanto, essa solução apresenta uma alta capacidade de carga e um processo de execução rápido, o que a torna altamente competitiva em relação às estacas tradicionalmente utilizadas no mercado.

O método de execução dessa estaca envolve a perfuração do solo em alta velocidade por rotação, empregando jatos simultâneos de nata de cimento com médias e altas pressões. Esse processo resulta em um diâmetro final aproximadamente duas vezes maior do que o diâmetro da broca utilizada.

Para comprovar a eficácia dessa solução, foram coletados dados de uma obra real de usina eólica localizada no estado do Ceará. O estudo incluiu a realização de testes de carga e uma análise detalhada do comportamento mecânico da fundação em um solo de baixa resistência. Os resultados obtidos a partir da extrapolação das cargas registradas nos ensaios estáticos foram satisfatórios, o que indica que a estaca Alluvial Anker® apresenta-se como uma promissora solução de fundação para aerogeradores.

Com base nessas informações, pode-se concluir que a estaca Alluvial Anker® mostra-se como uma alternativa viável e eficiente para o suporte de turbinas eólicas na costa brasileira. Sua alta capacidade de carga, rápido processo de execução e resultados satisfatórios nos testes realizados oferecem uma solução promissora para as futuras instalações de aerogeradores nessa região.

Palavras-chaves:

Estacas injetadas autoperfurantes; Aluvial Anker; Fundações de turbinas eólicas; Ensaio de carga.

ABSTRACT

The research aimed to investigate a technical solution for the foundations of wind turbines located on the Brazilian coast. The Alluvial Anker® pile is an innovative technique for executing foundations using piles, still little known in the civil construction market. However, this solution has a high load capacity and a fast execution process, which makes it highly competitive in relation to the piles traditionally used in the market.

The execution method for this pile involves drilling the soil at high speed per rotation, using simultaneous jets of cement paste with medium and high pressures. This process results in a final diameter approximately twice as large as the diameter of the drill used.

To prove the effectiveness of this solution, data were collected from a real wind power plant located in the state of Ceará. The study included carrying out load tests and a detailed analysis of the mechanical behavior of the foundation in a low strength soil. The results obtained from the extrapolation of the loads registered in the static tests were satisfactory, which indicates that the Alluvial Anker® pile presents itself as a promising foundation solution for wind turbines.

Based on this information, it can be concluded that the Alluvial Anker® pile is a viable and efficient alternative for supporting wind turbines on the Brazilian coast. Its high load capacity, fast execution process and satisfactory results in the tests performed offer a promising solution for future installations of wind turbines in this region.

Keywords:

Self-drilling injected piles; Alluvial anker; Wind turbine foundations; Load test.

1. INTRODUÇÃO

Com as políticas ambientais definidas a partir da Rio-92, descritas na agenda 21, os países se comprometeram a desenvolver uma economia em nível mundial mais eficiente e equitativa, bem como o gerenciamento dos recursos naturais e o desenvolvimento sustentável que deve ser um item prioritário na agenda da comunidade internacional. Para alcançar esses objetivos de preservação ambiental e continuar a desenvolver as economias nacionais, algumas nações investiram na utilização de fontes de energia renováveis, buscando equilibrar o desenvolvimento econômico e a preservação do meio ambiente, visto o crescimento desenfreado do uso de combustíveis fósseis.

Com a utilização mais ampla dessas fontes ao longo das décadas, o mundo segue buscando uma gestão mais eficiente de matriz energética e ambiental. O Brasil em 2022 situou-se na 12^o posição das maiores economias mundiais (IMF, 2023), como também reconhecido devido sua geração de energia elétrica sustentável, com mais de 80% da matriz ser proveniente de fontes renováveis (EPE, 2022), sendo evidenciado desde de 2020, ao alcançar a 3^o posição mundial de capacidade instalada de energias renováveis (IRENA, 2023).

Nas duas últimas décadas o país assistiu a uma rápida expansão dos setores de energias renováveis, especialmente o setor eólico que em 2021 registrou a capacidade instalada de 21,57 GW, consolidando-se como a segunda fonte da matriz energética no Brasil, beneficiando 86,3 milhões de pessoas e 28,8 milhões de residências por mês (ABEeólica, 2023). Diante deste cenário, a indústria da construção civil brasileira desenvolveu técnicas e tecnologias que viabilizassem a execução de projetos propostos do setor de energia eólica mesmo em situações controversas.

Antes de qualquer projeto, é essencial realizar estudos de viabilidade, sendo um desafio comum lidar com as características naturais do local da construção. A estabilidade da edificação depende das fundações e do solo, que suportam todas as cargas. Da mesma forma, a instalação de um complexo eólico

requer estudos sobre frequência dos ventos, capacidade de geração e deslocamentos das redes e pessoas, entre outros fatores. Conciliar essas características naturais necessárias para a construção de complexos eólicos é um desafio significativo para a indústria da construção civil.

Aerogeradores enfrentam altas cargas e esforços, assim como intempéries como ventos e vibrações sísmicas. Portanto, as fundações devem ser capazes de suportar forças laterais elevadas, bem como forças perpendiculares de tração e compressão. No Brasil, a construção civil geralmente usa grandes bases gravitacionais com estaqueamento em hélice contínua monitorada (HCM) de grandes diâmetros ou estaca raiz para estabilizar as torres eólicas. No entanto, essas soluções requerem um volume significativo de material e um custo elevado, além de várias fases executivas. Contudo uma alternativa pouco difundida no mercado é o uso de estacas injetáveis autoperfurantes, que são estruturas mais simples e fáceis de executar, especialmente em solos de baixa resistência.

As estacas autoperfurantes têm a capacidade de atingir grandes profundidades em solos de baixa resistência devido à sua capacidade de serem inclinadas em diferentes ângulos, de zero a noventa graus. Isso permite aumentar a resistência lateral, pois o peso do solo exerce uma contribuição sobre a estaca. De acordo com Santos Neto (1981), estacas inclinadas não só se beneficiam da aderência estaca-solo, que é independente da posição da estaca, mas também da contribuição do peso do solo sobre a estaca, o que favorece a capacidade de carga diante de cargas horizontais, como as provenientes de aerogeradores. Essas estacas formam um sistema integrado de estabilidade para a estrutura, por meio dos esforços passivos desenvolvidos no sistema.

A problemática da pesquisa consiste em apresentar um estudo detalhado sobre o processo executivo de uma estaca que ainda não recebeu ampla divulgação, mas que se mostra como uma solução de fundação promissora para turbinas eólicas. Essa estaca em questão possui um diâmetro reduzido, sendo moldada *in loco* através de perfuração rotativa e injeções simultâneas de médias e altas pressões. O objetivo é descrever o comportamento mecânico dessa estaca e fornecer dados provenientes de uma obra de um complexo eólico, incluindo análises de provas de carga realizadas.

2. ESTADO DA ARTE/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Estaca Injetável Autoperfurante é uma derivação das microestacas e foi desenvolvida no Brasil na década de 70. Sua origem está ligada a um projeto de um viaduto de acesso entre as rodovias Pedro Taques e dos Imigrantes I, na região da Baixada Santista. Devido às condições complexas do terreno, com presença de rochas, a empresa responsável pela obra, ESTE Geotecnia e Fundações, desenvolveu a primeira microestaca tubular autoperfurante, utilizando nata de cimento como fluido de perfuração. O engenheiro João Duarte Guimarães Filho propôs essa alternativa mais rápida, que foi testada e aprovada por meio de ensaios de carga estáticos. (GUIMARÃES FILHO, 2004).

A empresa Alemã *ISCHEBECK* em 1985 lançou o sistema "*TINTAN Micropile*", um elemento similar ao empregado pela brasileira ESTE, esse elemento similar foi submetido há vários ensaios e testes de carga para verificar sua resistência. Comprovando a alta resistência de suas ancoragens e sendo regida pela norma DIN 4128 (1983). A brasileira foi denominada Alluvial Anker® (AA), como Estaca Tubular com

“fuste adicional de alto atrito lateral e diâmetro mínimo garantido” (ESTE GEOTECNIA E FUNDAÇÕES, 2015).

Mendoza (2013) afirma que a alemã da *ISCHEBECK* se trata de uma estaca constituída de um tubo rosqueado autoperfurante de alta pressão, com diâmetro máximo de 10 cm, o tubo funciona como armadura e aplicador de calda de cimento com pressão definida de projeto. Os tubos são conectados com brocas que variam de 5 a 28 cm, de acordo com o tipo de solo. A estaca é usualmente empregada em solos moles ou granulares, e com pressões distintas para os mesmos, o qual interfere no seu diâmetro final, variando conforme o solo local, sendo duas vezes o diâmetro da estaca em solos de cascalho a 1,2 vezes em solos de rocha muito alterada.

A estaca desenvolvida pelos brasileiros injetada autoperfurante ou Alluvial Anker®, apresenta-se como uma alternativa promissora quando o tempo é um fator determinante. Mendonza (2013) realizou estudos sobre o tempo de execução da Alluvial Anker®, em estacas de 17 centímetros de diâmetro e 8 metros de comprimento, em um solo poroso em Brasília - DF, o autor obteve como resultados um tempo médio de aproximadamente 20 minutos para execução de cada estaca, algumas estacas obtendo resultados de tempo inferior de 15 minutos para execução completa. Porém sua principal utilização no país ainda é como reforço de fundações ou melhoramento de solo, contudo a AA apresenta porte técnico – comercial para competir com estacas já consolidadas no mercado de obras de grande porte como fundações de aerogeradores.

O processo executivo da estaca Alluvial Anker® é semelhante ao da microestaca e estaca raiz, conforme ilustrado na Figura 1, com a diferença de que não utiliza válvulas manchetes. Além disso, uma das grandes vantagens é a sua capacidade de ser executada em qualquer tipo de solo, incluindo aluviões arenosos, tanto acima quanto abaixo do lençol freático. De acordo com Nunes (2013), essas estacas funcionam em um sistema estaca-solo, atuando como um terreno protendido.

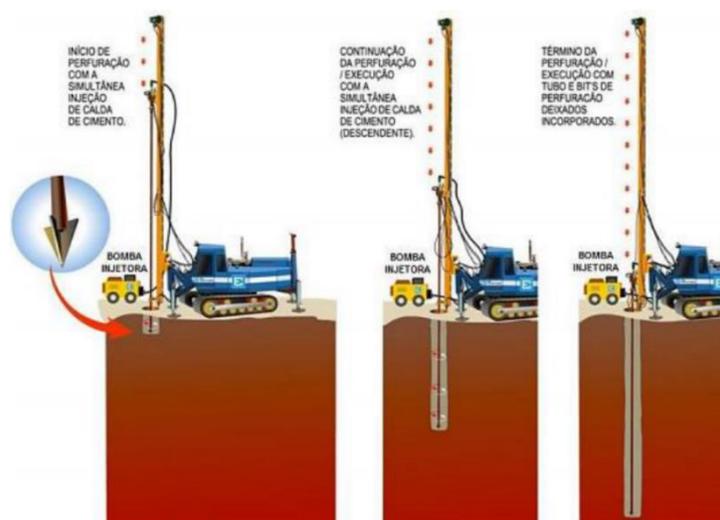


Figura 1 — Sequência executiva de uma estaca Alluvial Anker (ESTE Geotecnica e Fundações 2015)

Nos últimos 50 anos, a Alluvial Anker® passou por aperfeiçoamentos para garantir o diâmetro do fuste, segundo Guimarães Filho (2014), trata-se de um sistema de microestaca tubular que é executado em uma única operação, sem a necessidade de perfurar o solo com água, o que evita deformações e carregamento de finos em solos pouco compactos e colapsáveis durante a perfuração. Esse sistema é autoperfurante, com o tubo equipado com aletas e injeção simultânea de nata de cimento, que também atua como o fluido de perfuração. A estaca é formada pelo tubo com diâmetro definido pela rotação das aletas, sendo o próprio tubo a armadura principal da estaca, desde a superfície até a ponta, e todo esse processo ocorre em questão de minutos. A injeção de nata de cimento penetra no maciço, desagrega o solo e mistura-se ao cimento, aumentando sua resistência e transformando-o em uma ancoragem contínua, um solo "super armado" (Figura 2).

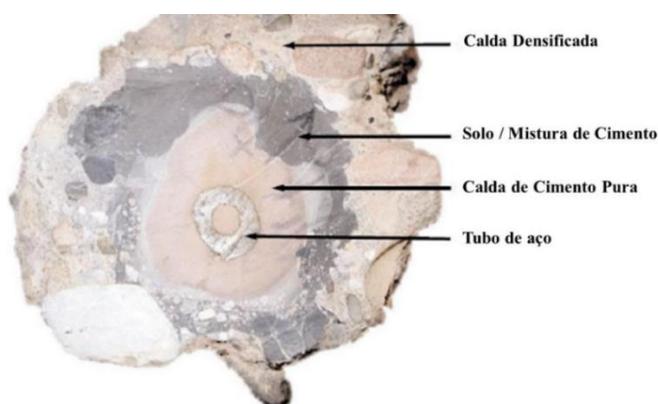


Figura 2 — Seção de uma EIA (ASCHENBROICH 2001).

A ancoragem estaca-solo é obtida pela perfuração e injeção simultânea, através de ferramenta que executa o fuste de alta aderência com diâmetro duplicado. O método descrito não provoca vibrações nem deslocamentos no terreno, ou seja, provocam mínima perturbação do maciço. O Alluvial Anker® é uma microestaca moldada in loco usando um tubo de aço sem costura adaptado para perfurar o solo por rotação. O tubo de aço N80 serve como armadura principal da estaca, proporcionando alta resistência à compressão, flexão, cisalhamento e flambagem. Armaduras complementares, como barras de aço ROCSOLO ou CA50, podem ser adicionadas para aumentar a resistência em compressão, cisalhamento e flexão. Essas armaduras são inseridas antes do endurecimento da calda de cimento, e a armadura complementar ROCSOLO pode ser estendida por meio de luvas de extensão e fixada com porcas em segmentos de estacas com maiores tensões.

Na ponta da estaca localiza-se um elemento de aço para perfuração (ponteira de perfuração), a qual possui ferramenta de corte (perdida) e passagem de fluido (calda de cimento) em formato de seta ou tricône, com função de perfurar trechos de forma rotativa, proporcionando o alargamento do fuste, com o aumento da área lateral, contribuindo para elevar a capacidade de carga. Em solos com coesão significativa, opta-se por utilizar ponteira tipo tricône, para garantir o avanço da perfuração, devido melhor desagregação durante a perfuração. Contudo, ocorre uma dispersão maior do fluido, devido o atrito com a ponteira tipo tricône (Figura 3), o que aumenta o refluxo e pela mistura com os resíduos sólidos da perfuração.

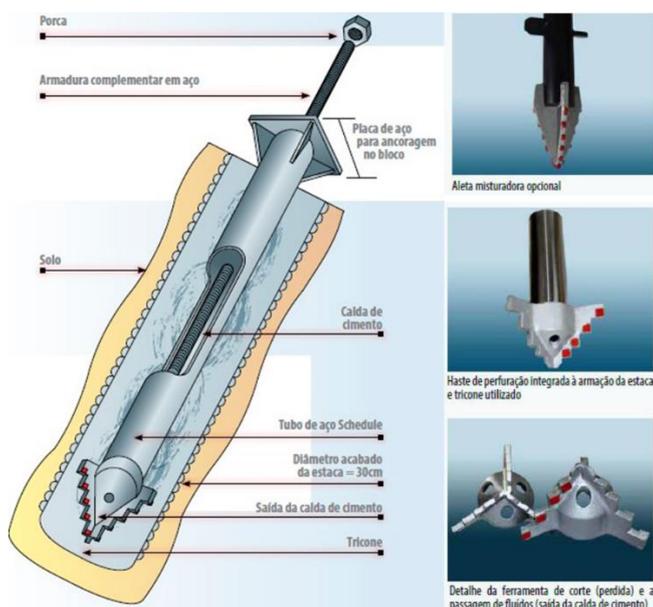


Figura 3 — Detalhamento da estaca Alluvial Anker (Adaptado ESTE Geotecnia e Fundações 2015)

Mesmo o aço sendo o principal responsável pela resistência da AA, as operações de injeção têm um grande impacto sobre a capacidade da microestaca, a calda de cimento tem a função de transferir as cargas ao solo circundante, promovendo um maior atrito lateral e protegendo as armaduras de corrosão.

A calda de cimento para injeção deve apresentar propriedades adequadas de fluidez, estabilidade e durabilidade, e para a correta injeção de calda de cimento é necessário que a central de injeção seja instalada de forma a facilitar o bombeamento e injeção da calda, evitando que a mesma possa interferir no processo executivo e na produtividade do serviço.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA DE CAMPO (EÓLICA BONS VENTOS)

A pesquisa baseia-se em duas etapas principais, uma breve revisão bibliográfica, na qual foi apresentado o processo executivo da Alluvial Anker®, bem como sua caracterização mecânica e a fundamentação teórica baseada em estudos de referência. Consoante a isto, neste capítulo será apresentado a análise dos dados de prova de carga das AA da obra da Usina Eólica de Bons Ventos, no estado do Ceará.

Entre 2007 e 2008, o Ceará se tornou líder nacional em capacidade instalada de energia eólica, com um crescimento anual notável de 29,5%, representando um aumento de 22,3% em relação ao ano anterior. Durante esse período, foi construído o maior complexo eólico do Brasil na época. A empresa Bons Ventos Geradora de Energia S/A foi fundada em 2007 como parte do programa PROINFA, com o objetivo de implantar e operar quatro parques eólicos nos municípios de Aracati e São Gonçalo do Amarante, no Ceará, por 20 anos. O complexo possui 75 aerogeradores modelo Suzlon S-88, fabricados pela Suzlon, com uma potência total instalada de 155 MW. Cada turbina tem uma potência de 2100 kW,

um rotor com 88 metros de diâmetro e torres de aço de 80 metros de altura. Essas turbinas operam em velocidade nominal de 14 m/s.

O investimento total no complexo foi de R\$ 750 milhões. Sua produção anual atingia 550.000 MWh, o suficiente para fornecer energia a aproximadamente 500 mil pessoas através do sistema interligado nacional.

Inicialmente, o projeto do complexo previa o uso de fundações superficiais com área de 113,10 m², ancoradas em estacas do tipo HCM. No entanto, a execução dessas estacas no local da obra se mostrou inviável devido à presença de dunas móveis. Alguns dos fatores inviáveis para utilização dessas estacas nessa formação geológica foram:

- Devido ao solo arenoso da área, a perfuratriz não teria estabilidade e apoio das esteiras;
- A necessidade de guias ou máquinas similares para erguer e instalar as armaduras das fundações profundas.
- A exigência de caminhões betoneiras e a necessidade de uma usina de concreto a uma distância máxima de 2,5 horas para evitar a utilização de aditivos que aceleram o tempo de endurecimento, o que aumentaria o custo das fundações, além dos gastos com transporte.
- Risco de entupimento da tubulação devido ao endurecimento ou segregação dos materiais do concreto.

Para enfrentar esses desafios, foram utilizadas microestacas injetáveis autoperfurantes devido à facilidade de instalação e à presença de uma central de injeção no local. As fundações superficiais adotadas para o complexo consistiam em bases circulares de concreto, com diâmetro de 11 metros e área de 50,27 m². Cada base era sustentada por 36 estacas Alluvial Anker®, com diâmetro de 300 milímetros. As estacas tinham inclinações variando de 0 a 12° e seus comprimentos variavam de 10 a 27 metros, totalizando a execução de 2.700 estacas ao longo da obra, garantindo a estabilidade das fundações.

Considerando a extensão considerável do complexo eólico e as características geotécnicas semelhantes nos dois municípios envolvidos, juntamente com a instalação de cerca de 90% dos aerogeradores no município de Aracati, o autor escolheu conduzir o estudo com base em dados de um parque eólico específico localizado em Aracati, no Ceará.

3.1 Caracterização geológica e geotécnica da obra

De acordo com Pedrosa (2016), a Costa Nordeste do Brasil, onde está localizada a obra em questão, é predominantemente composta pelos sedimentos terciários da Formação Barreiras. Esses sedimentos, parcialmente trabalhados durante o Pleistoceno e Holoceno, originaram os tabuleiros costeiros e os campos de dunas na região. Esses sedimentos da Formação Barreiras se sobrepõem ao embasamento cristalino e aos depósitos mais antigos pertencentes às diversas bacias sedimentares que ocorrem na margem continental brasileira. Bezerra (2001) complementa que a Formação Barreiras representa o último depósito sedimentar terciário na região Nordeste do país, formada durante a história da abertura do Atlântico, essa formação sedimentar se estende por mais de 4.000 km do litoral nordestino.

Sales (2002) aponta as dificuldades de se distinguir os sedimentos Barreiras dos depósitos dunares antigos. No presente, eles são atingidos pelas ondas que atuam no litoral cearense, pela ação dos ventos alísios e das brisas marítimas, e pela dissecação fluvial, sendo este o mais importante entre

os processos morfológicos, contudo esse processo resulta da pequena espessura dos depósitos Barreiras, o que não é evidenciado no local de instalação dos aerogeradores.

As dunas móveis, por sua vez, são formações características das regiões costeiras e estão diretamente relacionadas à presença dos sedimentos da Formação Barreiras. Essas dunas são moldadas pelos ventos dominantes na região e podem apresentar diferentes formas e tamanhos. Pedrosa (2016) descreve as dunas móveis como uma característica marcante da zona costeira do Ceará. Elas representam apenas uma parte minoritária dos campos de dunas, enquanto a maioria é composta por campos antigos. Em Aracati - CE, as praias estão situadas em uma extensa área de dunas móveis com solo arenoso de espessura elevada (Figura 4).

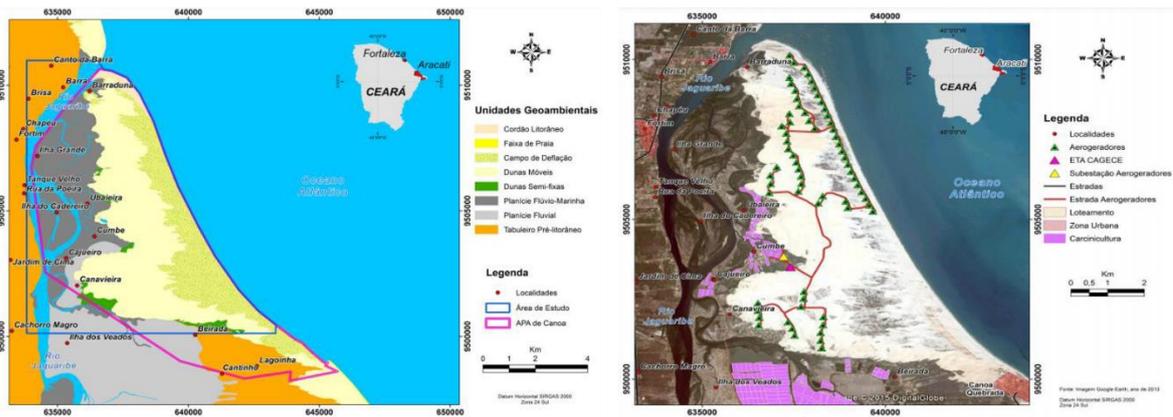


Figura 4 — Unidade geoambientais de Aracati - CE com localização dos aerogeradores (Adaptado Pedrosa 2016)

Conforme ensaio penetração *Standart Penetration Test* (SPT) da área de um dos aerogeradores apresentado na Figura 5, o perfil geotécnico na área correspondente a usina e os estudos geológicos realizados apresentados na Figura 4, conclui-se que a área é caracterizada por mais de 35 metros de solo arenoso, com granulometria fina, e compactidade crescente com a profundidade. Nos 7 primeiros metros apresenta índice de resistência a penetração (N_{spt}) com valor médio aproximado de 28, caracterizando camadas de solo mais compactos, seguidas de 23 metros de solo com índices a penetração baixos, caracterizando um solo arenoso fofo.

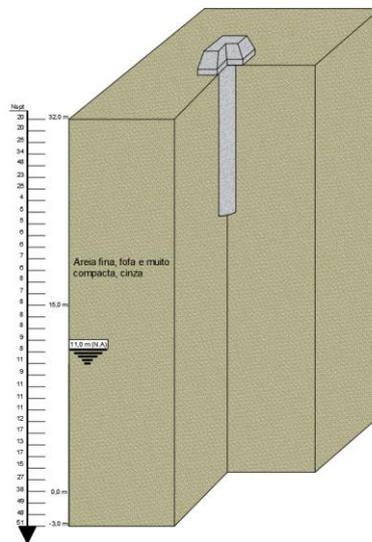


Figura 5 — Ensaio a percussão SPT de um aerogerador da obra (Adaptado TECNORD 2008)

3.2 Ensaio de carga

Realizaram-se testes de carga *in loco* utilizando cavaletes ancorados em estacas Alluvial Anker® com comprimentos variados, próximos à base dos aerogeradores, para simular carregamentos realistas e preservar as características geotécnicas do solo local. Os cavaletes foram reforçados em compressão e tração, utilizando quatro barras de aço Rocsolo 40 t para conexão com o sistema de reação. Além disso, nas estacas submetidas a ensaios de compressão e tração, foram adicionadas duas barras de aço Rocsolo de 38 mm, fixadas com porcas soldadas no tubo de aço de 3½" (armação das microestacas) conforme figura 6.

Para os testes de carga, foram utilizadas bombas manuais e hidráulicas com capacidade de aproximadamente 4.000 kN, aplicando carga no cavalete por meio de um sistema de atiramento usando as estacas AA. Foi colocada uma placa metálica de 20 milímetros no topo das estacas para receber o macaco hidráulico, e nos ensaios de compressão e tração, utilizou-se uma viga metálica dupla de 4 metros de comprimento para transferir as cargas.

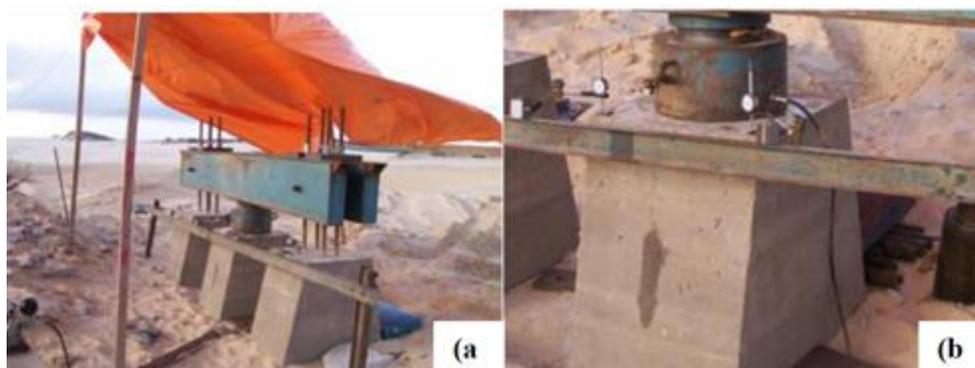


Figura 6 — Prova de cargas dos cavaletes: a) Ensaio a tração; e b) Ensaio a compressão (SILVA 2011)

As provas de carga analisadas neste estudo referem-se à fundação superficial N° 11 do Parque Eólico Canoa Quebrada, localizada no centro do complexo no município de Aracati – CE. Dentre as provas de carga disponibilizadas pela ESTE Geotécnica e Fundações, foram selecionadas quatro provas estáticas, sendo duas em compressão e duas em tração, executadas na base NCQ - 11. Todas as provas foram realizadas em estacas com 12,45 metros de comprimento e 0,30 metros de diâmetro, permitindo a comparação de dados entre diferentes estacas do mesmo aerogerador.

No ensaio de compressão da estaca EC - 01 da base NCQ- 11 (Figura 7a), foram aplicadas cargas progressivas em 10 estágios, com um incremento de 150 kN por estágio, atingindo uma carga máxima de aproximadamente 1500 kN. Em seguida, foi realizado o descarregamento em 5 estágios, com uma redução de 300 kN por estágio. O gráfico resultante do ensaio apresentou uma resposta linear, com um recalque máximo de cerca de 2% do diâmetro da estaca. Ao final do processo de descarregamento, foi observado um recalque residual de 1,17 mm, indicando uma recuperação elástica quase total da estaca.

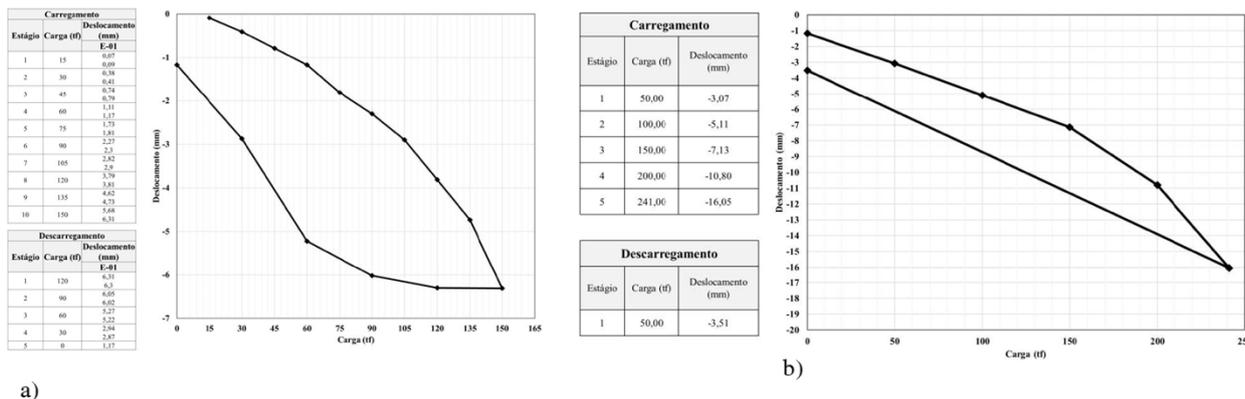


Figura 7 — Prova de carga compressão a) EC -01 – NCQ – 11; b) EC -02 – NCQ – 11 (Adaptado TECNORD ESTE Geotecnia e Fundações 2008)

No ensaio de compressão rápida da estaca EC-02 da base NCQ - 11, foram realizados ensaios de compressão e tração. No ensaio de compressão, à estaca foi submetida a uma carga máxima de aproximadamente 2410 kN (Figura 7b), que era três vezes maior que sua carga de projeto. O recalque máximo observado foi de 5,35% do diâmetro da estaca. O carregamento foi feito em cinco estágios, com incrementos de 500 kN por estágio. O ensaio teve que ser interrompido quando atingiu 2410 kN devido a um vazamento em um macaco hidráulico, impossibilitando a continuação dos carregamentos. O descarregamento foi concluído em um único estágio, e as leituras foram registradas após o descarregamento total.

As estacas ET-01 e ET-02, na base NCQ - 11, foram submetidas a ensaios de tração, com carga correspondente a duas vezes a carga de trabalho prevista (Figura 8), conforme recomendado pela ABNT NBR 6122/2019, ou seja, 750 kN. Após a estabilização da carga, que ocorreu em 10 estágios com incremento de 75 kN por estágio, foi observada uma perfeita interação entre o sistema estaca-solo, conforme evidenciado na curva. Ambas as microestacas apresentaram comportamento semelhante na fase plástica, com recalques progressivos crescentes, porém sem uma ruptura definida, com recalques inferiores a 5 mm, ou seja, menores que 2% do diâmetro da microestaca.

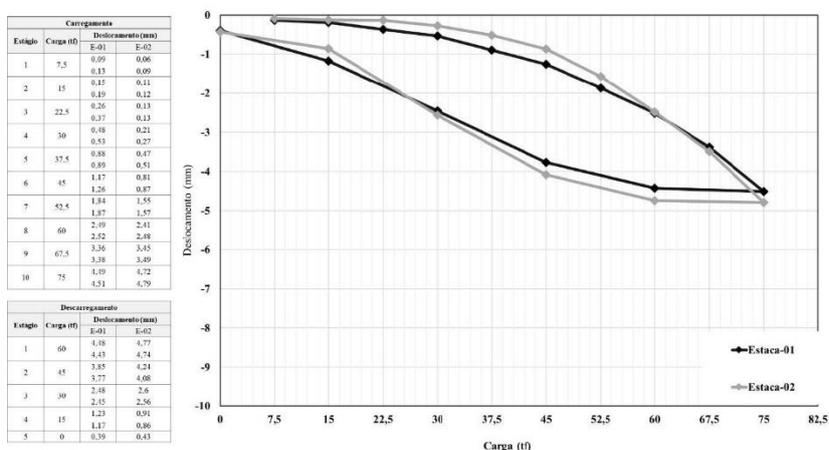


Figura 8 – Prova de cargas de tração – ET -01 e ET - 02 – NCQ-11 (Adaptado TECNORD ESTE Geotecnia e Fundações 2008)

Para os mesmos recalques, as microestacas apresentaram resistência à tração de 75% ou mais da resistência à compressão, atendendo satisfatoriamente às afirmações de McClelland (1972), que sugere que o atrito lateral na tração seja aproximadamente 70% do atrito lateral na compressão, e também de Poulos e Davis (1980), que recomendam considerar o atrito lateral na tração igual a 2/3 da compressão. Os recalques residuais das estacas após o descarregamento foram de 0,43 mm, correspondendo a menos de 0,15% do diâmetro da estaca.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Devido à ausência de ruptura nos ensaios estáticos realizados no complexo eólico, o autor optou por utilizar o método de Van der Veen (1953) para extrapolar as cargas e obter os valores limite de trabalho para as estacas ensaiadas. A extrapolação das cargas de ruptura foi realizada conforme a metodologia proposta por Aoki (1976), utilizando o coeficiente linear da reta de regressão entre os pontos representados por $\ln(1-Q/Qult) \times \rho$. Foi empregado um método iterativo automatizado, utilizando uma planilha eletrônica do Excel com programação adicional em VBA (*Visual Basic for Applications*).

No ensaio de compressão da estaca 01 da base NCQ-11, foi obtida uma carga de ruptura extrapolada equivalente a duas vezes a carga de trabalho, resultando em um recalque máximo de aproximadamente 9% do diâmetro da estaca. A linearidade do gráfico indica um comportamento consistente (Figura 9).

No ensaio de compressão da estaca 02, foi registrada uma carga de ruptura superior a quatro vezes a carga de trabalho, e 1,42 vezes a carga do último estágio antes da interrupção mecânica do equipamento. O recalque máximo com a carga máxima representa 43% do diâmetro da estaca, ou seja, 10,34% do seu comprimento total, demonstrando alta resistência à ruptura (Figura 8). No entanto, a estaca não atenderia a outros critérios sob cargas tão elevadas.

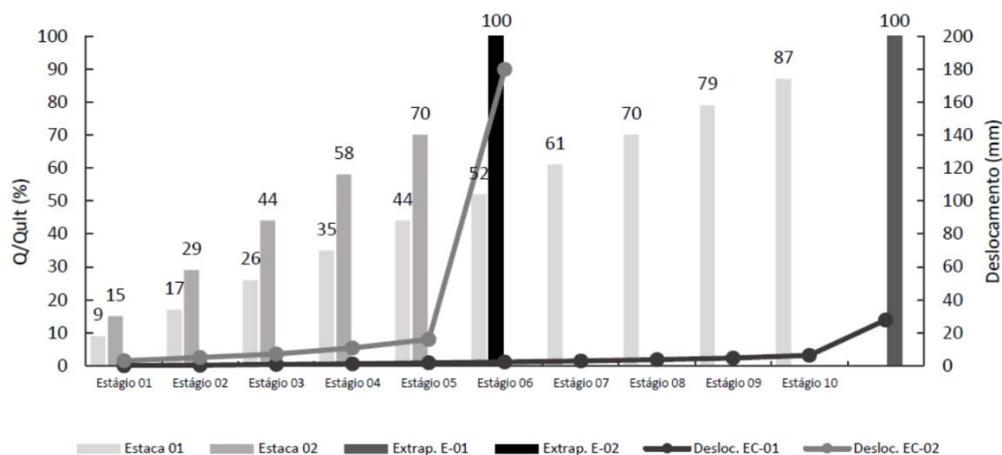


Figura 9 – Extrapolação carga de ruptura a compressão EC – 01 e EC - 02 – NCQ - 11 (Autor 2023)

Nos ensaios de tração das estacas, foi observado que as cargas de ruptura extrapoladas eram próximas às cargas registradas no último estágio. No entanto, o deslocamento ao atingir a carga de ruptura era significativamente maior (2,9 vezes para a estaca 01 e 2,3 vezes para a estaca 02) em comparação

ao último estágio, indicando uma rápida evolução do deslocamento na ruptura. Isso pode representar uma desvantagem para análises futuras (Figura 10).

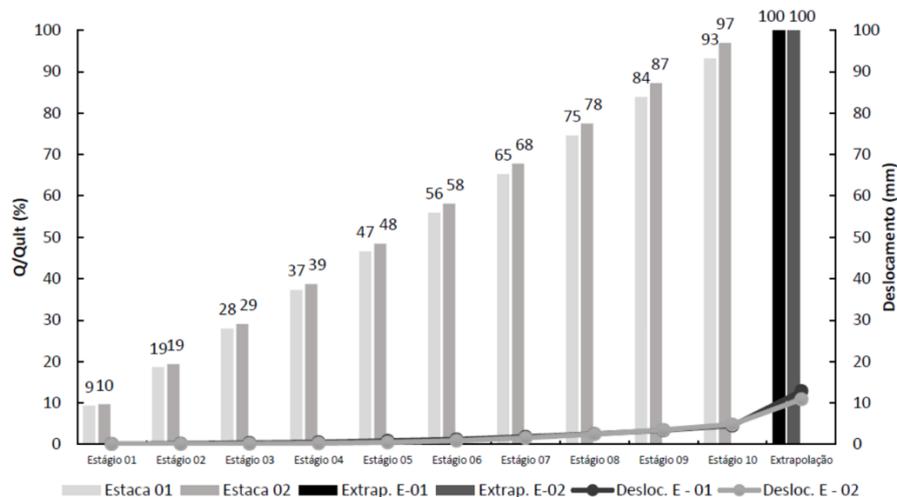


Figura 10 – Extrapolação carga de ruptura a tração ET – 01 e ET - 02 (Autor 2023)

A Tabela a seguir (Figura 11) resume os resultados das provas de carga e compara-os com as cargas limites obtidos através da extrapolação pelo método de Van Der Veen (1953), com o incremento proposto por Aoki (1976). É possível observar que tanto nos ensaios de compressão como nos ensaios de tração das estacas 01 e 02, o desempenho foi satisfatório de acordo com a norma ABNT NBR 6122/2019, que estabelece um fator de segurança mínimo de 2,0 em relação à carga de ruptura nos ensaios e em sua extrapolação.

Tipo	Ensaio estático	Estaca	Deslocamento total (mm)	Deslocamento residual (mm)	Carga de trabalho	Carga de Ruptura (Van Der Veen)	Fator de Segurança
Compressão	Lento	EC-01	6,31	1,17	735,50 kN	1685,00 kN	2,29
	Rápido até a ruptura	EC-02	16,05	3,51	735,50 kN	3369,00 kN	4,58
Tração	Lento	ET-01	4,51	0,43	367,75 kN	789,00 kN	2,15
	Lento	ET-02	4,79	0,43	367,75 kN	759,00 kN	2,06

Figura 11 – Resumo dos resultados das provas de carga (Autor 2023)

Segundo Velloso e Lopes (2010), o ensaio lento é mais representativo das condições de carregamento em uma fundação sob uma estrutura futura. À medida que a carga se aproxima da ruptura, o tempo necessário para a estabilização aumenta, indicando um comportamento mais realístico do sistema solo-estaca. Ensaios rápidos tendem a produzir um aumento na capacidade de carga e rigidez do sistema, o que pode alterar as relações entre as cargas e os recalques. Portanto, as provas de carga lentas são consideradas mais realistas. No ensaio rápido, observou-se um aumento contínuo no deslocamento da estaca à medida que o carregamento avançava, representando um desafio futuro em termos de análise e aprimoramento do sistema. É importante ressaltar que a estaca apresentou melhores resultados de deslocamento no ensaio lento.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- O tubo de aço N80, armadura principal da Alluvial Anker® é o principal responsável pela resistência estrutural da microestaca a compressão, flexão, cisalhamento e flambagem, sendo a calda de cimento apenas responsável pela transferência das cargas ao solo circundante;
- Apesar da possibilidade de execução da Alluvial Anker® sem armadura complementar, e o tubo de aço N80 ser a armadura principal, as armaduras complementares contribuem para a resistência a compressão, cisalhamento e flexão;
- A calda de cimento injetada a altas pressões penetra nos vazios do solo, o que permite uma ancoragem contínua, sem ruptura hidráulica do solo, e transformando o sistema em um solo super-armado;
- A evolução na distinção das ponteiras, conforme o tipo de solo, permite uma execução mais rápida da perfuração e injeção, e conseqüentemente da execução da estaca;
- Na Alluvial Anker® em relação as demais microestacas pode ser observado uma ancoragem contínua, diferentemente das demais microestacas e da estaca raiz, que ao utilizar injeção por fases, não conseguem repetir fases rigorosas e alcançam pseudo injeções, e conseqüentemente bulbos parciais;
- A utilização de estacas injetáveis autoperfurante em fundações de aerogeradores podem gerar economia, tendo em vista a redução do tempo de execução em relação aos outros tipos de estacas.
- As estacas Alluvial Anker® ensaiadas no estudo de caso desta pesquisa resistiram a valores superiores a pelo menos duas vezes a carga de trabalho, ou seja, atendendo o fator de segurança mínimo normativo;
- A microestaca injetável autoperfurante mantém o desempenho de resistência em solo com baixa resistência como o solo arenoso fino como nas formações barreiras, encontrado na grande parte do litoral nordestino brasileiro, locais que apresentam características físicas para implantação de usinas eólicas.
- Recomenda-se realizar ensaios em grupo de estacas AA, para obter dados reais do comportamento do grupo de estacas e não somente de uma estaca isolada;
- É essencial para a comprovação da viabilidade da estaca em fundações de aerogeradores realizar análises com um número maior de provas de cargas de solos com formações variantes, para comparar o comportamento da Alluvial Anker® em solos distintos comumente executados usinas eólicas;

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e Execução de Fundações (NBR 6122)**. Rio de Janeiro, 2019. 108p.

ASCHENBROICH, H. **Micropile Reinforcement Systems and Corrosion Protection**. Ln: Micro-pile Seminar, 2001, Charlotte. Anais... North Carolina: ADSC, 2001. v. 1, p. 1 – 12.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA – ABEEólica. **Boletim anual 2021**. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/07/ABEEOLICA_BOLETIMANUAL-2021_PORT.pdf>. Acesso em 21 junho 2023.

BEZERRA, F. H. R. et al. **Pliocene-quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil**. Journal of South American Earth Sciences. Amsterdam, v. 14, p. 61-75, 2001.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em 15 junho 2023.

ESTE GEOTECNIA E FUNDAÇÕES LTDA. **Catálogo técnico**. Brasília, 2015. 8 p.
GUIMARÃES FILHO, J. D. **Estacas injetadas**. Seminário sobre Fundações Profundas, Porto Alegre, PUCRS, outubro, 2004.

GUIMARRÃES FILHO, J. D. **Microestaca tubular injetada de bulbo contínuo (Alluvial Anker)**. Revista Fundações & Obras Geotécnicas. ed. 41, 2014. p. 52 – 59.

INTERNATIONAL MONETARY FUND - IMF. **World Economic Outlook: A Rocky Recovery**. Washington, DC, October, 2023. p. 206.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY-IRENA. **Renewable energy statistics 2023**. Abu Dhabi, 2023. 440p.

MCCLELLAND, B.. **Design and performance of deep foundations**. In: **Specialty Conference on performance of earth and earth supported structures**, ASCE, 1972, Indiana. Proceedings... v. 2, p. 111-142, 1972.

MENDOZA, C.C. **Estudo do comportamento mecânico e numérico de grupo de estacas do tipo Alluvial Anker em solo poroso do Distrito Federal**. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 2013. 234p.

NUNES, S. C. O. **Métodos de dimensionamento de reforço e estabilização de taludes com microestacas**. Tese para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, Faculdade de ciências e tecnologia Universidade de Coimbra, Coimbra, 2013. 83p.

PEDROSA, A. A., **A geodinâmica e morfogênese das dunas eólicas no município de Canoa Quebrada, Aracati, Ceará, Brasil**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, UFC. 2016. 111p.

POULO, H. G., DAVIS, E. H., **Pile foundation analysis and design**. New York. John Wiley & Sons, 1980. 397p.

SALES, C. V. C. **Les littoraux Du Ceará: evolution géomorphologique de la zone côtière de L ´Etat Du Ceará**, Du long terme au court terme. Sorbonne. Thèse Doctorat, Université Paris. 2002. 523p.

SANTOS NETO. **Métodos de cálculo de atrito negativo em estacas: estudo e discussão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – I Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1981. 244p.

SILVA, R. R. C. da. **Estacas Injetadas Autoperfurantes: metodologia de execução e determinação de sua capacidade de carga através de métodos semi – empíricos**. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo. 2011. 216p.

TECNORD - ESTE Geotecnia e Fundações Ltda. **Provas de cargas**. São Paulo, 2008. 1 p.

VAN DER VEEN, C. **The bearing capacity of a pile**. Ln: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3., Zurich. Proceedings... ISSMFE, 1953. v.2, p. 84-90.

VELLOSO, D. A., LOPES, F. R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 583p.vesic