



Adaptação de fundações por estacas do tipo hélice contínua para aproveitamento da energia geotérmica superficial

Juliana Pessin

Professora, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil, jpressin@id.uff.br

Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha

Professora, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, Brasil, chctsuha@sc.usp.br

RESUMO: Este trabalho descreve a execução de fundações por estacas trocadoras de calor do tipo hélice contínua, construídas para reduzir o consumo de energia elétrica para a climatização do edifício CICS *Living Lab*, atualmente em construção no *campus* da USP em São Paulo. Além de suportarem as cargas da estrutura, essas fundações serão utilizadas para o aproveitamento da energia geotérmica superficial disponível no subsolo. Durante a execução das estacas trocadoras de calor, são instalados tubos de polietileno na armação, que permitem a transferência de calor do ambiente para o solo e vice-versa, por meio de um fluido que circula em circuito fechado. Este sistema pode ser usado para resfriar ou aquecer ambientes, processos industriais, e aquecer água de piscinas e banheiros. O procedimento executivo das estacas desenvolvido para o caso do CICS, baseado em trabalhos experimentais anteriores, é detalhado neste artigo. Nessa obra, os tubos trocadores de calor fixados à armação das estacas, instrumentadas com sensores de deformação e temperatura, foram inseridos no concreto fresco considerando o processo executivo de estacas hélice contínua. Além do procedimento de execução, são ressaltados neste trabalho os desafios e as lições aprendidas na implementação dessa tecnologia nesse estudo de caso.

PALAVRAS-CHAVE: Estudo de caso, fundações, estacas do tipo hélice contínua, energia geotérmica superficial

ABSTRACT: This work describes the construction of continuous flight auger (CFA) energy piles, aiming to reduce the electrical energy consumption with air conditioning of the CICS Living Lab building, under construction on the USP campus in São Paulo. In addition to supporting the structure loads, these foundations will be used to exploit the shallow geothermal energy available in the soil. During the execution of the heat exchanger piles, polyethylene pipes are installed in the cage, allowing heat transfer from the environment to the soil and vice versa, through a fluid that circulates in a closed circuit. This system can be used to cool or heat environments, industrial processes, and heat water in swimming pools and bathrooms. The pile executive procedure developed for CICS was based on previous experimental work and detailed in this article. At CICS, the heat exchanger pipes fixed to the cages, instrumented with deformation and temperature sensors, were inserted in the fresh concrete considering the executive process of CFA piles. In addition to the execution procedure, the challenges and lessons learned in implementing this technology in this case study are highlighted in this work.

KEYWORDS: Case study, foundations, continuous flight auger piles, shallow geothermal energy

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1 Introdução

O aumento dos gastos com climatização no Brasil e a forte dependência da matriz elétrica brasileira da energia hidráulica, que apesar de ser categorizada como renovável, gera impactos ambientais importantes, estimulam a exploração de novas fontes sustentáveis para a geração de energia. Neste contexto, a energia geotérmica superficial se apresenta como uma alternativa a ser explorada em solos brasileiros, pois além do caráter sustentável, pode proporcionar economia de energia elétrica para climatização de ambientes. A energia geotérmica foi citada no Plano Nacional de Energia 2050 como uma das tecnologias capazes de alterar significativamente o mercado de energia, mas para o qual tem-se poucos elementos para antever sua inserção na matriz energética e os desdobramentos decorrentes (Brasil, 2020).

A energia geotérmica superficial é encontrada em profundidades menores que 400 m e pode ser utilizada para climatização de edifícios por meio de bomba de calor acoplada às fundações de obras civis, conhecidas como “estacas trocadoras de calor”, “estacas geotérmicas” ou “estacas de energia”. O funcionamento destes sistemas se deve ao fato de a temperatura média do solo a partir de certa profundidade ser aproximadamente constante, geralmente inferior à temperatura ambiente no verão e superior no inverno. As bombas de calor geotérmicas podem ser usadas para aquecer e para resfriar o ambiente, de acordo com a época do ano. Durante o inverno, as tubulações inseridas nas fundações conectadas à bomba de calor retiram o calor do solo e enviam para o ambiente, e durante o verão, depositam no solo o calor extraído do ambiente (Figura 1).

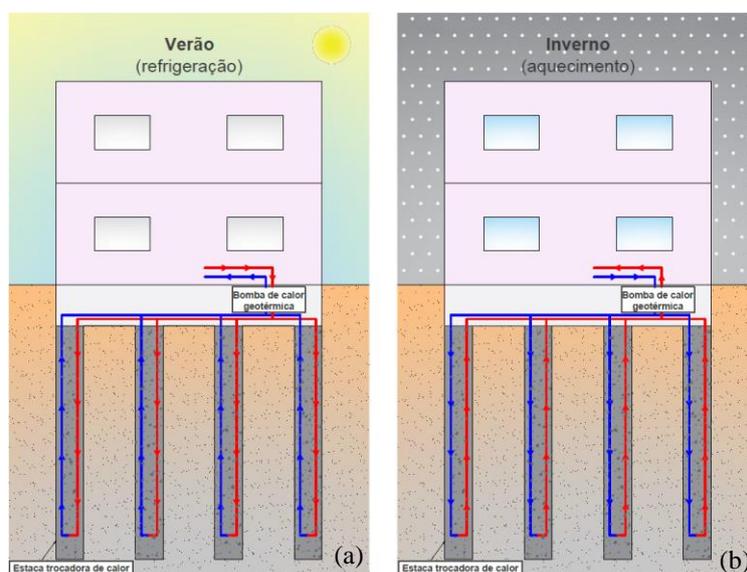


Figura 1. Utilização de bombas de calor geotérmicas acopladas às fundações em edificações: (a) operação de refrigeração e (b) de aquecimento (Adaptado de Pessin e Tsuha, 2023).

Durante a execução dessas fundações, são instalados tubos de polietileno em sua armação, que permitem a transferência de calor do ambiente para o solo e vice-versa, por meio de um fluido, geralmente a água, que circula em circuito fechado com o auxílio de uma bomba de calor. No interior da estaca os tubos trocadores de calor podem estar dispostos em várias configurações, como U simples, duplo U, W, triplo U e espiral. As configurações são definidas em função do diâmetro da estaca, das demandas energéticas do edifício e das características do subsolo.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Neste contexto, este trabalho tem por objetivo descrever um caso de execução de estacas trocadoras de calor em um edifício no Brasil, o CICS *Living Lab*. Mais especificamente, são relatados os procedimentos de execução assim como desafios e lições aprendidas na montagem e execução de estacas trocadoras de calor do tipo hélice contínua com diferentes configurações de tubos trocadores de calor e concreto de baixa pegada de carbono. A preparação das estacas foi guiada pela experiência e recomendações apresentadas em trabalhos anteriores, cabendo destacar Brandl (2006), CFMS/SYNTEC (2017) e Morais (2019). Além da instalação dos tubos trocadores de calor, as estacas foram instrumentadas com sensores de temperatura e de deformação dado o pioneirismo da implementação no Brasil e o caráter científico do Edifício.

2 Edifício CICS

O Centro de Inovação de Construção Sustentável, CICS *Living Lab*, consiste em um edifício onde vêm sendo testadas diferentes soluções inovadoras de baixo impacto ambiental e contará com laboratórios, salas de reunião e espaço multiuso para exposições. Em construção na Universidade de São Paulo, *campus* Butantã, na cidade de São Paulo, o CICS, é um projeto desenvolvido por professores, pesquisadores, estudantes da USP e de outras Universidades e por profissionais da indústria. O uso de sistemas de estacas trocadoras de calor para fins de climatização é uma das soluções sustentáveis que vem sendo avaliadas no Edifício (CICS, 2023).

A construção do CICS possibilitará a aplicação e monitoramento de sistemas de climatização por meio de estacas trocadoras de calor pela primeira vez em um edifício no Brasil. Assim, a implementação dessas estacas constitui uma oportunidade pioneira e de extrema relevância para avaliar a viabilidade da utilização de sistemas de climatização por estacas trocadoras de calor em solo e clima brasileiros. O projeto arquitetônico do CICS é apresentado nas Figuras 2a e 2b: o edifício 1 será construído sobre as estacas hélice contínua, objeto deste trabalho; o edifício 2 será um prédio de escadas a ser construído sobre as estacas tubulares metálicas testadas em Murari, Tsuha e Loveridge (2022); e o edifício 3 será apenas reformado.

O CICS está localizado próximo à Raia Olímpica da USP e ao Rio Pinheiros, no *campus* da USP na Cidade Universitária (Figura 2c). Considerando a proximidade do CICS desses corpos d'água e que o grau de saturação e fluxo de água subterrânea são fatores-chave a serem avaliados no projeto e desempenho das estacas trocadoras de calor, investigações de campo foram conduzidas no local do CICS a fim de quantificar o regime de fluxo e as características das camadas do subsolo, resultados que foram apresentados em Pessin *et al.* (2022).



Figura 2. CICS *Living Lab*.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



As fundações do edifício CICS foram executadas no segundo semestre de 2019 e compreendem treze estacas do tipo hélice contínua e oito estacas tubulares metálicas. Além das fundações necessárias para suportar as cargas do edifício, foram construídas cinco estacas hélice contínua e vinte estacas tubulares metálicas para fins de investigação do comportamento carga-recalque, térmico e termomecânico das fundações. Com exceção de uma, todas as estacas, do edifício e pilotos, foram adaptadas a fim de exercerem a função de estacas trocadoras de calor.

3 Preparação das estacas trocadoras de calor

3.1 Instalação dos tubos trocadores de calor

Os tubos trocadores de calor utilizados nas estacas hélice contínua do edifício CICS são de polietileno de alta densidade (PEAD) e possuem 32 mm de diâmetro externo e 26 mm de diâmetro interno. Os tubos foram dispostos em triplo U nas estacas do edifício e nas cinco estacas piloto em diferentes configurações: duplo U (1), triplo U (1) e em espiral com passos de 300 mm (1), 450 mm (1) e 600 mm (1).

Para a montagem das estacas com *loops* em U (duplo U e triplo U), os tubos foram cortados em segmentos antes de serem instalados na armação. Esse comprimento foi definido em função das dimensões da armação, descontando do comprimento total o trecho de arranque mais 50 cm, e 30 cm da ponta, de acordo com as recomendações apresentadas em CFMS/SYNTEC (2017). O espaço livre na ponta da armação se faz necessário para que as conexões estejam bem protegidas durante a inserção da estaca no furo preenchido com concreto fresco, enquanto o espaço livre no topo da armação é importante para proteger as conexões durante a quebra da cabeça da estaca para a execução dos blocos de coroamento.

A principal conexão utilizada para compor os *loops* dos tubos em U foi uma junção a 45° de 1" de ferro galvanizado, conectada aos tubos PEAD por meio de um adaptador reto de latão e abraçadeiras de metal. Para inserir os adaptadores retos nos tubos, utilizou-se um soprador térmico e pasta lubrificante (Figuras 3a e 3b). Com o tubo ligeiramente quente, abraçadeiras metálicas foram apertadas próximas às conexões. A fim de evitar que se movessem durante a execução, as conexões foram presas à gaiola por meio de arames (Figura 3c). Os tubos foram fixados à armação por meio de abraçadeiras de nylon a cada 60 cm, aproximadamente (Figura 3d), e a cada 30 cm próximo à ponta e topo da armação.

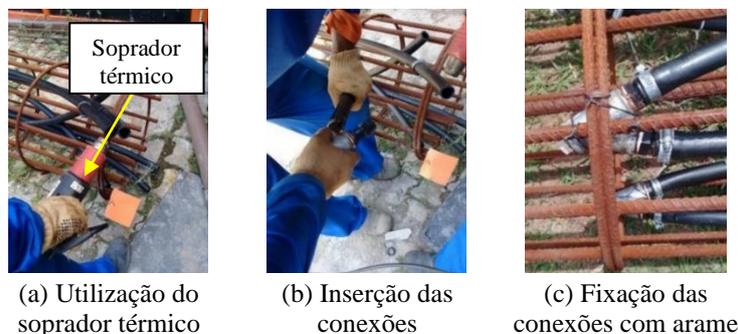
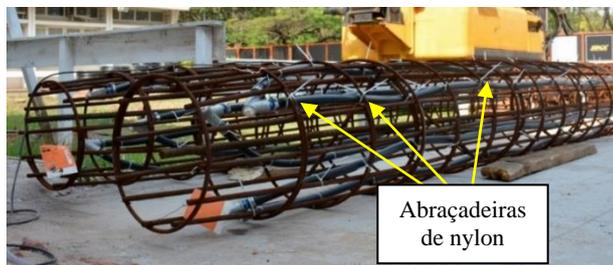


Figura 3. Montagem da estaca com configuração em triplo U.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





(d) Fixação dos tubos na armação com abraçadeiras de nylon

Figura 3. Montagem da estaca com configuração em triplo U (continuação).

Diferente das estacas com *loops* em U, a montagem dos tubos em configuração espiral demandou muito esforço físico para a formação dos *loops*, devido à rigidez dos tubos PEAD. O procedimento adotado consistiu em passar a extremidade do tubo por dentro da armação em direção à sua base, estando o rolo de tubo próximo ao topo; em seguida, fazia-se um “círculo” com o tubo e inseria-o na parte interna da armação e próximo à sua ponta, a fim de facilitar o início da confecção da espiral (Figura 4a). Fixado o círculo na armação com abraçadeiras de nylon, a espiral ia sendo formada puxando-se o tubo e prendendo-o progressivamente com as abraçadeiras na armação (Figura 4b), de acordo com os passos da espiral previamente marcados com giz na armação. Por fim, uma junção a 45° foi acoplada na base da espiral, e um segmento de tubo com o comprimento da armação foi ligado à essa conexão para formar o *loop* completo. A grande vantagem da configuração em espiral em relação às configurações em U é a utilização de apenas uma conexão, na base do *loop* (Figuras 4c e 4d).

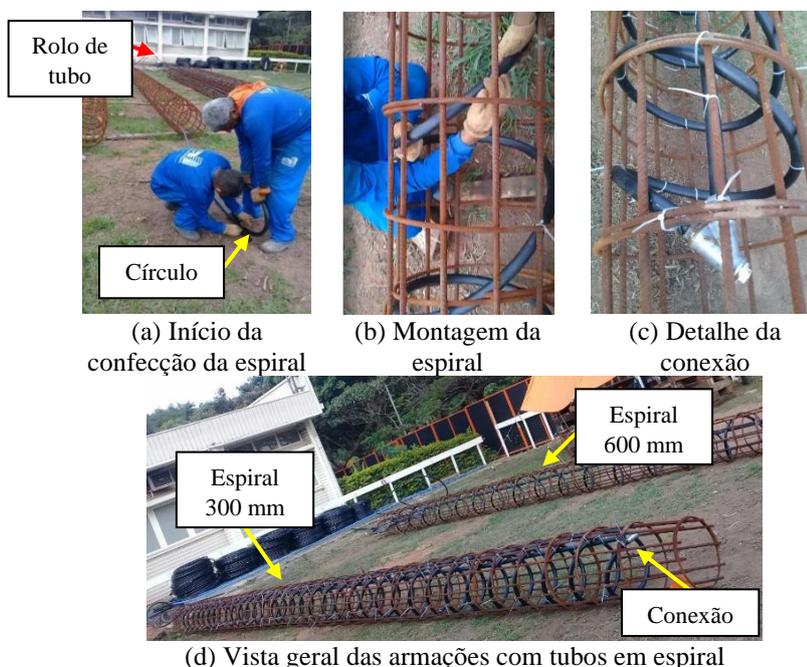


Figura 4. Montagem da estaca com configuração em espiral.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



3.2 Instrumentação

As fundações por estacas do tipo hélice contínua foram instrumentadas com sensores de temperatura do tipo Pt-100 (Figura 5a). Em algumas fundações também foram instaladas barras instrumentadas com *strain gages* para medir as cargas axiais atuantes ao longo do comprimento da estaca (Figura 5b). O Pt-100 é um sensor resistivo que se baseia no princípio de que a resistência elétrica de um fio de metal varia com a temperatura. É feito de Platina (Pt), e seu valor de resistência elétrica à temperatura de 0 °C é de 100 Ω, conforme indicado por sua nomenclatura “Pt-100”. Devido à sua melhor precisão, todas as estacas trocadoras do CICS foram instrumentadas com Pt-100 Classe A.

Para monitorar as cargas axiais em algumas estacas, vinte barras instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência (*strain gages*) foram montadas em laboratório. Os extensômetros foram dispostos em um circuito de ponte completa, para a medição da deformação da estaca. Para cada barra, foram utilizados dois *strain gages* biaxiais (quatro *strain gages* ativos).

Todas as estacas hélice contínua foram instrumentadas com sensores de temperatura, mas apenas uma estaca piloto (Tripla U) e três estacas do edifício foram instrumentadas também com *strain gages*. Nas estacas com dupla instrumentação, os sensores foram instalados em uma barra central soldada no centro da armação (Figuras 5c e 5d), enquanto nas demais estacas todos os sensores foram instalados na armação (Figura 5e). Além disso, na profundidade de 5,5 m na estaca piloto com configuração em Tripla U, foram instalados três sensores de temperatura: um na barra central, um na armação e um no tubo PEAD (Figura 5f).

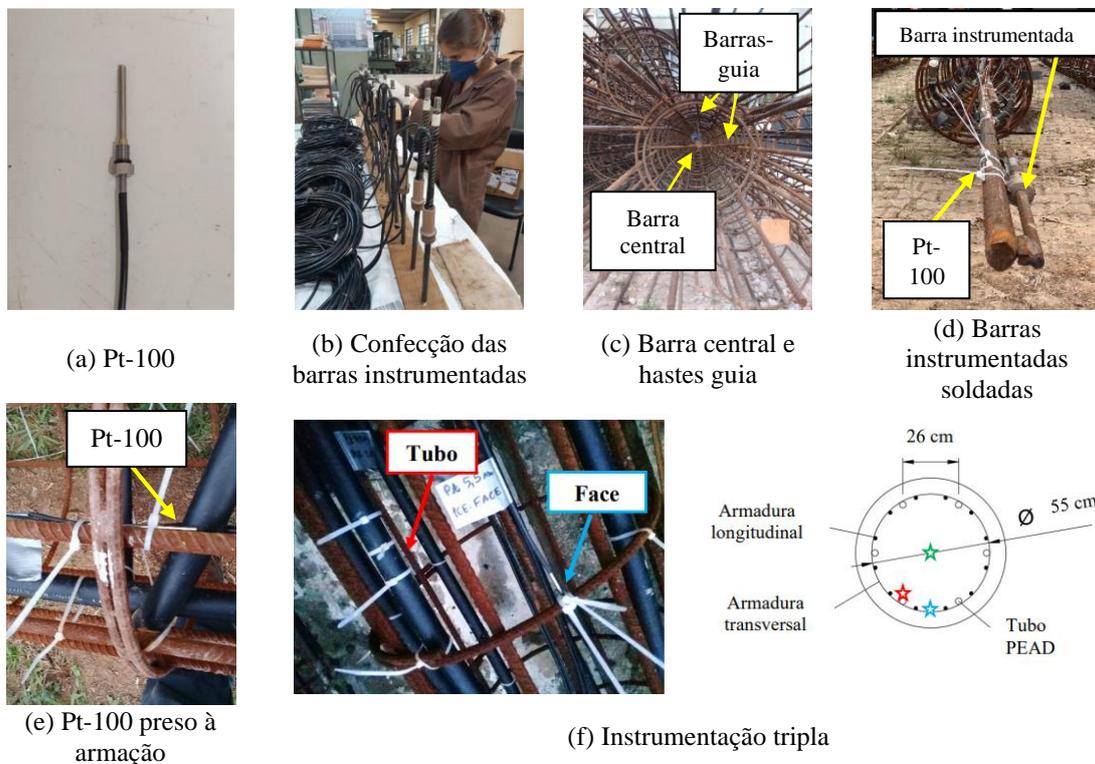


Figura 5. Instrumentação das estacas.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Os sensores de temperatura foram distribuídos de acordo com a variação do solo e da velocidade de fluxo da água subterrânea ao longo das estacas, apresentada em Pessin *et al.* (2022). Foram instalados principalmente na camada de argila mole (3,5 m), na camada de areia que seria a mais permeável (5,5 m), na camada de areia a 8,5 m e próximo à base da armação, a 11,5 m, como apresentado na Figura 6. O tipo de solo e o fluxo de água influenciam na troca de calor da estaca com o subsolo.

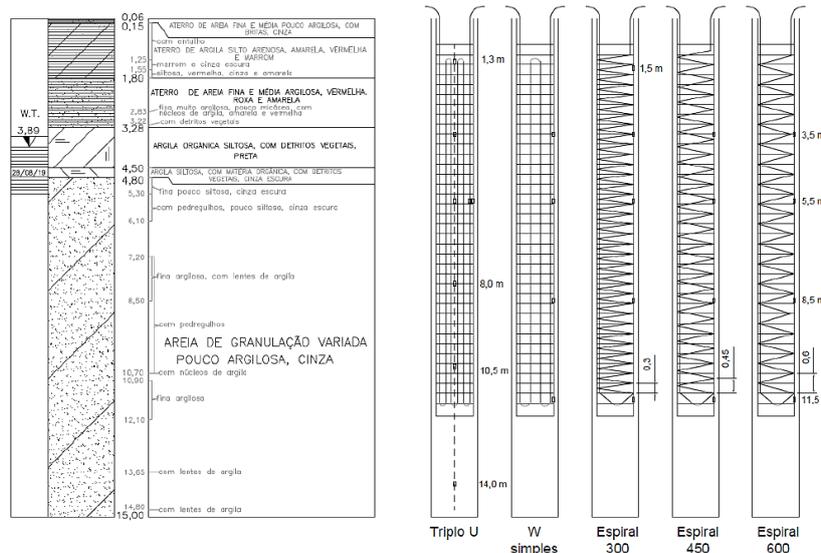


Figura 6. Distribuição dos sensores nas estacas piloto e perfil estratigráfico correspondente (Adaptado de Pessin (2021) e Engesolos (2019)).

4 Execução das fundações por estacas trocadores de calor

As estacas trocadoras de calor do tipo hélice contínua foram executadas de acordo com o procedimento padrão adotado para este tipo de estaca, exceto pelo cuidado com os sensores e tubos, principalmente porque a armação é inserida no concreto fresco. Além disso, a utilização de uma armação de 12 m de comprimento trouxe desafios à execução, pois para estacas hélice contínua geralmente se utilizam-se armações com comprimentos inferiores. No caso do projeto do CICS, o comprimento previsto para uma estaca convencional era da ordem de 6 m. Vale salientar que os estribos foram soldados às barras longitudinais da armação, ao invés de apenas amarrados, de modo a conferir maior rigidez e facilitar a sua inserção no concreto. Apesar do comprimento longo, a armação consideravelmente longa proporcionou a instalação dos tubos de geotermia até maiores profundidades.

As estacas foram concretadas com concreto do tipo LEAP, sigla proveniente do inglês *Low emission advanced performance*. O concreto LEAP consiste em um concreto de baixa emissão de CO₂ e com desempenho avançado, e demanda menor quantidade de água na produção. O concreto utilizado foi formulado por meio de uma parceria entre a Escola Politécnica da USP e uma empresa fabricante de cimento. Foram utilizados 176 litros de água por metro cúbico de concreto, o que representa uma redução de 52% em relação aos teores convencionais, entre 250-300 litros/m³ (INFRAROI, 2020).

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



A composição e controle do concreto foram fundamentais para facilitar a inserção da armação na estaca. Além disso, caso seja utilizado concreto de composição especial, recomenda-se a realização de um teste de execução prévio antes da instalação efetiva das fundações.

Antes da instalação da armação, os cabos dos sensores da maioria das estacas foram protegidos com conduítes (Figura 7a) e os roletes espaçadores da armação foram reforçados com arame (Figura 7b), de modo a evitar que se desprendessem durante a inserção no furo com concreto fresco. Além disso, os tubos de PEAD foram preenchidos com água e fechados nas extremidades para evitar possível estrangulamento. As Figuras 7c a 7f apresentam algumas etapas do procedimento executivo das estacas hélice contínua. De acordo com o projeto dos blocos das estacas do edifício principal do CICS, a altura dos blocos variava consideravelmente, e, portanto, a cota de topo das armações foi variável entre as estacas. Para posicionar as armações na cota especificada, foi desenvolvida a ferramenta apresentada na Figura 7g, que era empurrada pela base da concha da retroscavadeira sobre a armação (Figura 7h). Feito isso, o topo do concreto fresco era removido ao máximo considerando-se a cota da base do bloco. Vale mencionar que a instrumentação das armações levou em consideração a variação de altura dos blocos.



Figura 7. Preparo e execução das estacas.

Caso o comprimento total planejado de armação não tenha entrado no furo por completo e esta não for removida, deve-se readaptar o projeto. Se a armação for removida, recomenda-se fazer um novo teste de vazamento nos tubos e lavar a armação antes de inseri-la novamente no próximo furo.

5 Execução de bloco de coroamento para prova de carga em estaca trocadora de calor

Um ensaio de prova de carga estática (PCE) instrumentada a compressão foi realizada na estaca piloto com configuração em Triplo U para determinar o comportamento carga-

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



deslocamento da fundação além da distribuição de carga ao longo da estaca (Pessin, 2021). Antes disso, foi necessário dimensionar e construir um bloco de coroamento sobre a estaca a ser ensaiada. Na execução do bloco foi utilizado um concreto com resistência à compressão f_{ck} estimada em 30 MPa.

O procedimento seguido na construção do bloco é apresentado na Figura 8. Após a escavação (Figura 8a), a quebra manual da estaca foi feita cuidadosamente por um martelo de demolição até o nível definido (Figura 8b). A colocação da gaiola consistiu em uma etapa crítica: os tubos PEAD e conduítes com os cabos dos sensores foram passados pela base da armação e, posteriormente, pela lateral, enquanto ela era elevada e ajustada ao centro da estaca (Figura 8c). Os tubos PEAD foram passados pela lateral da armação por meio de cotovelos de PVC de 90°, pois não poderiam atravessar o topo do bloco que deveria ficar livre para os ensaios de carga (Figura 8d). A vibração do concreto (Figura 8e) foi realizada em quatro camadas e, após 3 dias, a bloco foi desenformado (Figura 8f).



(a) Escavação



(b) Quebra da estaca



(c) Armação apoiada na fôrma



(d) Passagem dos tubos e cabos pela lateral do bloco



(e) Vibração do concreto



(f) Bloco desenformado

Figura 8. Execução do bloco de coroamento.

Após esta experiência, recomenda-se projetar uma armação de bloco com as barras tendo o maior espaçamento possível a fim de facilitar a passagem dos tubos trocadores de calor e conduítes com cabos de instrumentação.

6 Considerações finais

Neste trabalho foi descrita a preparação e execução das fundações por estacas trocadoras de calor do tipo hélice contínua, construídas para o edifício do CICS, com o objetivo de contribuir para o aprimoramento da técnica e estimular a utilização da energia geotérmica superficial disponível no subsolo de edifícios, uma energia renovável e abundante, que pode ser explorada por meio de fundações.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem o apoio financeiro concedido pelo CICS/USP, pela TUPER S/A (Convênio de Cooperação Técnica Científica entre TUPER S/A, FDTE e USP - Processo USP nº 19.1.00551.03.1), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Processo 2014 /14496-0), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPQ pelo apoio financeiro (Processo 310881/2018-8), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — CAPES (pela concessão da bolsa de doutorado da primeira autora).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brandl, H. (2006) Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56 (2), p. 81–122.
- Brasil (2020). Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Energia - PNE 2050*. Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, DF, 230 p.
- CICS (2023). *CICS USP*. Disponível em: <<https://cics.prp.usp.br/>>. Acesso em 10 de julho de 2023.
- CFMS/SYNTTEC (2017) Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en oeuvre des géostructures thermiques. *Revue Française de Géotechnique*, 149, 120p.
- Engesolos (2019). Resultados de ensaios.
- Google Earth (2023). *Localização do CICS Living Lab*. Acesso em 17 de julho de 2023.
- Infraroi (2020). *InterCement e USP testam, na prática, novo concreto que reduz consumo de água em 52%*. Disponível em: <<http://infraroi.com.br/intercement-e-usp-testam-na-pratica-novo-concreto-que-reduz-consumo-de-agua-em-52/>>. Acesso em 12 de julho de 2023.
- Morais, T. S. O. (2019) *Comportamento térmico e termomecânico de fundações por estacas trocadoras de calor em solos não saturados em região de clima subtropical*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, 293p.
- Murari, M. C. D. F., Tsuha, C. H. C., Loveridge, F. (2022) Investigation on the thermal response of steel pipe energy piles with different backfill materials. *Renewable Energy*, 199, p. 44-61.
- Pessin, J. (2021) *Estudo experimental do desempenho de fundações por estacas hélice contínua trocadoras de calor em solo arenoso saturado*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, 266p.
- Pessin, J., Tsuha, C. D. H. C. (2023) In-field performance of continuous flight auger (CFA) energy piles with different configurations. *Applied Thermal Engineering*, 224, 120113.
- Pessin, J., Tsuha, C. H. C., Giacheti, H. L., Riyis, M. T. (2022) Avaliação Experimental do Fluxo de Água Subterrânea para Projetos de Sistemas Geotérmicos por Estacas Trocadoras de Calor. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA - COBRAMSEG, 20, 2022, Campinas. *Anais eletrônicos...* Campinas, Galoá.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

