

# Sustentabilidade Associada às Fundações e Obras de Geotecnia

Letícia Mendonça Cardoso

Discente, UFRJ, Macaé, Brasil, leticiamendoncac@gmail.com

Gustavo Vaz de Mello Guimarães, D.Sc.

Docente, UFRJ, Macaé, Brasil, gvmg@poli.ufrj.br

Lucas Marques Pires da Silva

Mestrando, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, lucas.silva@coc.ufrj.br

**RESUMO:** A constante evolução do setor tecnológico tornou viável não só criar novas ferramentas que otimizem o cotidiano, mas também entender os impactos de antigos métodos na sociedade e, quando possível, remediá-los. No ramo da engenharia, a construção civil é um dos grandes geradores de resíduos e, naturalmente, tem procurado alinhar-se à esta direção, considerando questões econômicas, sociais e ambientais. No Brasil, dentro da construção civil, esta tendência já existe (e.g.: concreto a partir de RCS, edifícios sustentáveis, prédios verdes, etc.), mas na engenharia de fundações caminha a passos lentos, pois ainda encontra muitas barreiras. Neste sentido, devido à escassez de informações, o presente artigo busca reunir elementos sobre o desenvolvimento sustentável no âmbito das fundações através de uma revisão bibliográfica de casos publicados. Faz-se uma exposição de vantagens e desvantagens das propostas de soluções apresentadas, a fim de provocar a reflexão sobre a viabilidade da aplicação destas metodologias alternativas em obras de engenharia de fundações e geotecnia brasileira.

**PALAVRAS-CHAVE:** Otimização de Recursos, Tripé Sustentável, Fundações.

**ABSTRACT:** The constant evolution of the technological sector has made it feasible not only to create new tools that optimize daily life, but also to understand the impacts of old methods on society and, when it's possible, to remedy them. In the engineering industry, civil construction is one of the major generators of waste and, naturally, has sought to align itself with this direction, considering economic, social, and environmental issues. In Brazil, within civil construction, this trend already exists (e.g.: concrete from RCS, sustainable buildings, green buildings, etc.), but in foundation engineering it walks slowly, because it still faces many barriers. In this sense, due to the scarcity of information, this paper seeks to gather elements about sustainable development in the field of foundations through a literature review of published cases. The advantages and disadvantages of the proposed solutions are presented in order to provoke reflection on the feasibility of applying these alternative methodologies in Brazilian foundation engineering and geotechnical works.

**KEYWORDS:** Optimized Resources, Sustainability Tripod, Foundations.

## 1 Introdução

A sustentabilidade deve ser encarada como o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, garantindo a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. Esta capacidade deve ainda estar alinhada harmonicamente com interesses sociais, ambientais e econômicos, aspectos que compõem o tripé sustentável. Andersson et al. (2010) atenta que a sustentabilidade deve ser encarada a nível regional (vernacular), uma vez que relaciona-se com o local da pesquisa e a cultura nele inserida.

Partindo do pressuposto de que existe a necessidade de manutenção dos recursos naturais para as gerações futuras, objetiva-se com o presente trabalho evidenciar o potencial de reaproveitamento de materiais utilizados em fundações e a implementação de novas tecnologias sustentáveis.

Assim, a metodologia abordada no presente trabalho consistiu em uma revisão bibliográfica de casos associados ao reaproveitamento de materiais utilizados em fundações/geotecnia e a implementação de novas tecnologias para sua (re)utilização. Para a exposição dos estudos de caso analisados e sua viabilidade sustentável, propõe-se a contextualização do cenário da engenharia brasileira sob duas óticas: a primeira, diz

respeito à geração de resíduos de construção e seu descarte (associado, nesta pesquisa aos temas de reuso e reciclagem em fundações e reaproveitamento da lama bentonítica), enquanto a segunda, refere-se às matrizes energéticas nacionais (estacas geotérmicas).

## 2 Casos Analisados e Seus Aspectos Relevantes

### 2.1 Reuso e Reciclagem em Fundações

#### 2.1.1 Estacas pré-moldadas de concreto

A construção civil gera resíduos desde a preparação do terreno, passando pelas fundações, até as etapas finais da concepção da edificação. Todas essas atividades são responsáveis por fornecer um volume de resíduo sólido que supera duas vezes o lixo sólido urbano, segundo Salomão et al. (2019).

Yamamoto e Silva (2016) apresentam um estudo sobre o assoreamento e a erosão que agredem a Praia de Marahú localizada aproximadamente 70km de Belém, sendo parte da Ilha do Mosqueiro. A área, conhecida pelas suas belezas naturais, é uma região sem grande desenvolvimento econômico, sendo o turismo sua principal fonte de renda. As constantes erosões marítimas acometidas no local, que invadem a faixa de areia, chegando às ruas, vêm prejudicando cada vez mais a atividade turística naquela região. Para solucionar este problema, propõe-se a utilização das estacas pré-moldadas de concreto, referentes às sobras de obras de fundações locais, para a confecção de um quebra-mar que combata a ação da força das águas. Cabe ressaltar que esta ideia está aliada a não existência de um projeto adequado de reciclagem de tais sobras de estacas. Yamamoto e Silva (2016) discorrem que Belém possui solo aluvionar e de camadas argilosas, cuja conformação é apropriada para utilização de estacas pré-moldadas de concreto como elementos de fundação.

Nesse contexto, procurou-se elaborar a tabela 1 apresentando o desperdício de material (sobra de estacas) e financeiro de acordo com a SINAPI para a localidade Belém - PA, utilizando como base os custos desonerados de dezembro de 2014 e depois, maio de 2021, para expor os valores corrigidos. Como dados de entrada dessa estimativa, foram supostas a confecção de dez mil peças de estacas pré-moldadas de concreto no ano de 2014. Além disso, considerou-se que a maioria das estacas executadas naquela região possuem cerca de 12 m e foram utilizados os procedimentos usuais de reaproveitamento de estacas pré-moldadas de concreto, utilizados na prática da engenharia de fundações em todo o Brasil. Com base na SINAPI para Belém/PA, a figura 1 apresenta a variação dos custos unitários das estacas estudadas na tabela 1 na última década. Como a composição de tais itens sofreu alterações a partir do ano de 2015<sup>1</sup>, foi necessário descontar o custo de execução dos anos anteriores a 2015 através do percentual de redução de custo do ano de 2015 para 2016.

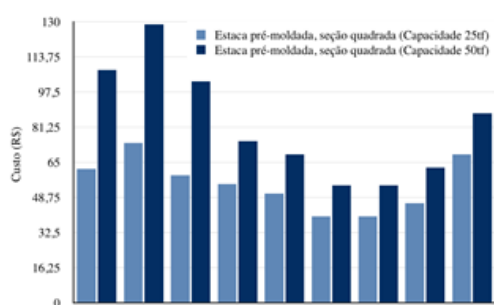


Figura 1 – Variação dos custos das estacas na última década de estacas pré-moldadas de concreto.

Tabela 1. Desperdício material e financeiro das sobras de estacas pré-moldadas de concreto.

| Descrição do item                         | Unid. | metro/estaca | Total de estacas | Quant. total | Preço Unitário (R\$) |       | Preço Total (R\$) |           |
|-------------------------------------------|-------|--------------|------------------|--------------|----------------------|-------|-------------------|-----------|
|                                           |       |              |                  |              | 2014                 | 2021  | 2014              | 2021      |
| Estaca quadrada, incl. emendas, cap. 25tf | m     | 3            | 5000             | 15000        | 73,91                | 68,69 | 1.108.650         | 1.030.350 |
| Estaca quadrada, incl. emendas, cap. 50tf | m     | 3            | 5000             | 15000        | 107,72               | 87,61 | 1.615.800         | 1.314.150 |

As dimensões explicitadas na tabela 1 exprimem a viabilidade desta proposta de solução no que tange a quantidade de materiais necessários e reforçam a carência de arrumar um novo fim para estes materiais, haja visto o investimento feito em sua compra. Uma análise visual da figura 1 também corrobora essa proposição, uma vez que nota-se que, embora o mercado tenha apresentado uma redução no consumo entre 2014 e 2018, o custo dos itens estudados crescem novamente após 2018. A reutilização dessas peças não necessariamente

<sup>1</sup> Não contempla a cravação da peça

está associada a uma função estrutural, pode estar relacionada a uma estrutura de gravidade como contenção ou quebra-mar.

Neste contexto, destacam-se os seguintes aspectos relevantes associados ao tripé sustentável e a questões técnicas:

- Há o reaproveitamento de materiais que seriam descartados, muitas vezes incorretamente. Além disso, a proposta evita a extração de novos materiais e também a liberação de CO<sub>2</sub>, ao passo que não é necessário o transporte a longas distâncias.
- Os autores asseguram a viabilidade do projeto uma vez que o número médio de estacas produzidas é proporcional ao número de obras a serem executadas. Assim, as expectativas são que as barreiras construídas com o reaproveitamento das estacas contenha o assoreamento e o processo erosivo presentes na Praia do Marahú, beneficiando a população e impulsionando o turismo local.
- Contudo, a desvantagem analisada é que, por se tratar de um estudo de viabilidade, sua aplicação prática é pouco conhecida.
- Como estas estacas estão sendo reutilizadas, ressalta-se que elas já passaram por um processo de cravação e receberam um certo número de golpes. Assim, deveria-se prever uma inspeção a fim de selecionar as estacas em melhor condição estrutural para serem utilizadas.

### 2.1.2 Estacas PET

Santos (2005) propõe a utilização das garrafas PET em obras de contenção e fundações. Este trabalho trata das fundações denominadas estacas PET. Para a confecção dessa estacas, são utilizadas garrafas do material, no volume de dois litros (figura 2a), preenchidas com solo desestruturado para utilização em fundações. Salienta-se que a aplicação de garrafas PET como estrutura de fundação pode ser feita somente com cargas de pequeno porte, submetidas a esforços apenas de compressão e situada acima do nível d'água.

O processo executivo consiste em acoplar as garrafas sucessivamente (figura 2b) até atingir a profundidade de projeto. O conjunto é então introduzido em um tubo de PVC. Deve-se escavar o fuste à trado e aplicar uma camada de concreto magro no fundo, antes de inserir o conjunto, comprimindo-o (figura 2c). Finaliza-se o processo retirando o PVC, preenchendo as laterais com areia e concretando o bloco de fundação.

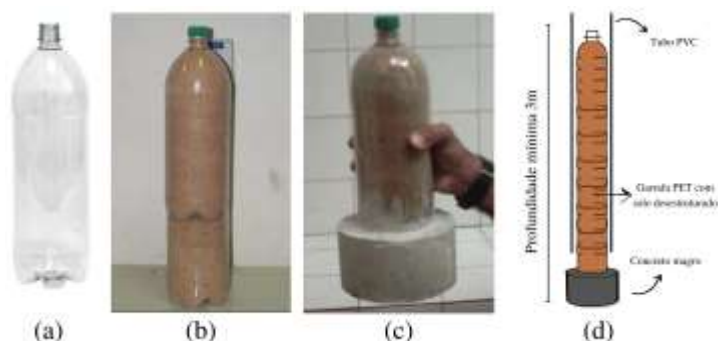


Figura 2 – (a) Garrafa PET 2L; (b) Garrafas preenchidas por solo e acopladas; (c) Garrafa inserida em concreto magro e (d) Esquema da estaca PET.

Os seguintes aspectos relevantes da utilização das garrafas PET para fundações merecem destaque:

- Os benefícios ambientais se dão com a reciclagem da garrafa PET, grande preocupação dos ambientalistas.
- Em relação ao critério econômico, o custo de material é praticamente nulo.
- Finalmente analisando o aspecto social, tem-se que as estacas apresentadas podem ser confeccionadas facilmente, não necessitando de mão de obra especializada. Em decorrência de tal fato, concede-se maior acesso à população, podendo ser utilizada em mutirões.

O seguinte aspecto negativo relevante da utilização das garrafas PET para fundações é:

- Indicação para obras de pequeno porte, transmitindo apenas 10kN por estaca e que, pelas características do material, esta estaca teria grande deformabilidade. Destaca-se que este é um estudo preliminar que tem como premissa apresentar uma proposta alternativa, considerando a viabilidade técnica e financeira envolvidas.

## 2.2 Lama de Bentonita

A lama bentonítica é composta por água e bentonita. Sua principal utilização na engenharia de fundações é estabilizar o solo em certos tipos de escavações. Embora tal material tenha ampla utilização e seja empregado há vários anos, o mesmo necessita de cuidados no descarte. Isso se deve ao fato de que a lama bentonítica possui uma densidade elevada e pode apresentar riscos de contaminação do ambiente. No seu descarte, ela pode provocar diminuição da permeabilidade do solo, provocando a mudança do curso d'água, tornando o solo improdutivo e levando ao impedimento da oxigenação de rios (extinção de fauna e flora).

Ressalta-se também a questão social, que ocorre em dois aspectos. O primeiro é quanto à saúde dos trabalhadores que manuseiam a lama bentonítica. Existem diferentes especificações para cada produto utilizado para realizar a mistura e formar a lama durante as obras de fundações. Por ser um produto em pó, o manuseio incorreto acarreta no surgimento de problemas respiratórios por exposição prolongada, sendo o pulmão um dos órgãos mais vulneráveis. Além disso, a inalação do material pode causar silicose e câncer pulmonar. O segundo aspecto refere-se ao impacto gerado pela obstrução dos leitos d'água pela lama bentonítica. Com a não oxigenação dos rios, há perda de vida marítima que, consequentemente, afeta o cotidiano dos pescadores.

Levando em consideração a magnitude das complicações retratadas, nota-se a necessidade de investir no tratamento do material ao fim de sua utilização. A princípio, a lama pode ser reciclada, o que permite que a mesma seja reutilizada e, com esta reutilização, há, consequentemente, uma redução de material a ser descartado no fim, visto que não se adquire mais lama.

O processo de reciclagem consiste em separar a lama (água e bentonita) dos materiais que se incorporam a mesma durante a escavação, como areia, argila e silte, e dos demais componentes vindos da concretagem da estaca. Para isso, é usado o reciclador, que passa a lama contaminada por duas peneiras vibratórias e por um ciclone até que a lama esteja limpa. Após esse processo de reciclagem, a lama retorna aos silos de armazenamento para reuso, enquanto o material resultante da reciclagem (solo) é descartado utilizando-se caminhões basculantes, da mesma maneira que o material oriundo da escavação. Consegue-se por este novo processo um aumento na reutilização da lama bentonítica.

Todavia, a lama de bentonita não pode ser reciclada e reutilizada infinitas vezes, como indica Alonso (2010) ao falar que, após algum tempo, necessita-se descartá-la. Este descarte deve ser realizado com cautela, uma vez que a mesma não pode ser jogada em qualquer aterro. Esta impossibilidade ocorre porque, embora seja um material inerte, a lama é “impermeabilizante”, não atendendo porquanto à classe IIA da NBR 10004. Para resolver este problema, a lama precisa ser tratada, tornando-se própria para ser lançada em aterros normalmente utilizados para o descarte, como os da citada.

Este tratamento consiste em utilizar um floculador, em que mistura-se a lama em um reservatório especial, onde será adicionado material floculante inorgânico. O floculante é adicionado à bentonita descartada dentro de um agitador, que separa os componentes desta lama antes de sedimentação dos mesmos no fundo do recipiente. Após a decantação, a água resultante pode ser utilizada na obra para lavagem de equipamentos e ruas, reduzindo desta maneira a quantidade de água consumida na obra quando comparada com o processo anterior em que o floculador não era empregado. O material decantado atende a classificação IIA da NBR 10004 e pode ser lançado em aterros normais.

Assim, os seguintes aspectos relevantes, que evidenciam as principais razões que levam a proposição da técnica da reciclagem da lama bentonítica, merecem destaque:

- Na questão ambiental, a reciclagem e o correto descarte impedem a impermeabilização do solo, que põe em risco a fauna e a flora local, ao passo que podem provocar mudanças de cursos d'água, tornando a terra improdutiva, ou bloquear a oxigenação de rios.
- O processo de transformação do material para descarte como resíduo classe IIA fornece, após a decantação, água propícia para utilização em atividades do canteiro de obras. Este reaproveitamento hídrico é de grande importância, já que segundo o Straub, apud *US Green Building Council* (2014), a construção civil consome cerca de 21% da água tratada no planeta.
- Reforça-se os benefícios sociais verificados com a preservação da saúde dos trabalhadores que manuseiam a lama bentonítica, uma vez que o produto pode acarretar problemas respiratórios e até câncer.



- De forma indireta, a manutenção da pescaria como fonte de renda para muitas famílias, proporcionada pela preservação dos cursos hídricos.  
 Por outro lado, os seguintes aspectos negativos relevantes merecem destaque:
- O tratamento da lama bentonítica, embora seja ambiental e socialmente necessário, ainda não está completamente alinhado ao tripé sustentável. Isso porque sua principal desvantagem é o alto custo envolvido na reciclagem da lama e ao transformá-la em resíduo Classe IIA para descartá-la.
- A reciclagem da lama não é proposta em estaca raiz ou sondagens, devido ao pequeno volume. No Brasil, infelizmente, quando aplicável, ocorre somente no caso de estacas escavadas com grande diâmetro (estações), pois o volume é muito maior. Tais limitações desvalorizam e inviabilizam a aplicação das referidas técnicas para a maioria das empresas que fazem uso da lama bentonítica em escavações.

### 2.3 Estacas Geotérmicas

As estacas trocadoras de calor, ou *Energy Piles*, são capazes de climatizar edifícios por meio de sistemas trocadores de calor<sup>2</sup> inseridos no solo (geotérmico). Brandl (2013) ressalta que, até o ano 2004, foram instaladas 22.843 estacas trocadoras de calor na Áustria. Graças ao seu clima tropical, o cotidiano brasileiro é marcado pelo emprego de sistemas refrigeradores. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) estima que em 2018, aproximadamente 14% do consumo de energia do país foi de responsabilidade dos aparelhos de ar condicionado. Considerando a grande demanda de energia para climatização de ambientes e a necessidade de aliviar o setor convencional, apresentam-se as estacas trocadoras de calor como uma possível solução sustentável a ser difundida no país para reduzir a demanda de energia para arrefecimento.

As estacas trocadoras de calor apresentam dupla função. Elas são fundações profundas que, ao mesmo tempo que transferem as cargas da superestrutura para o solo, realizam o aproveitamento de energia geotérmica a baixas profundidades e temperaturas, através de um sistema vertical de “loop” fechado. Este toma como premissa a estagnação das temperaturas do solo, bem como seu isolamento natural, com o avanço das profundidades, conferindo-lhe imunidade às alterações climáticas superficiais. No inverno, por apresentar-se mais quente que o ar, o solo irá transformar-se em fonte de energia, enquanto no verão, ele atuará de modo a absorver o calor. Ciriades (2019) aponta para a possibilidade de implantação deste sistema nos mais variados tipos de estacas, não recomendando as de madeira por suas características isolantes. Já de acordo com Moraes e Tsuha, apud Loveridge (2016), sua utilização mais comum é verificada nas estacas escavadas. Resumidamente, o sistema é composto pelas estacas em si, coletores de calor, dutos de conexão, conjuntos de bomba de calor e um armazenador. Salienta-se que deve haver cautela em sua execução para que não ocorra estreitamento da seção dos tubos. A figura 3(a) apresenta o esquema geral do funcionamento das estacas trocadoras de calor e a figura 3(b) mostra um esquema do fluxo de energia atuante em tal sistema. A partir da figura 3(c), pode-se conferir a disposição dos tubos após a concretagem da estaca.

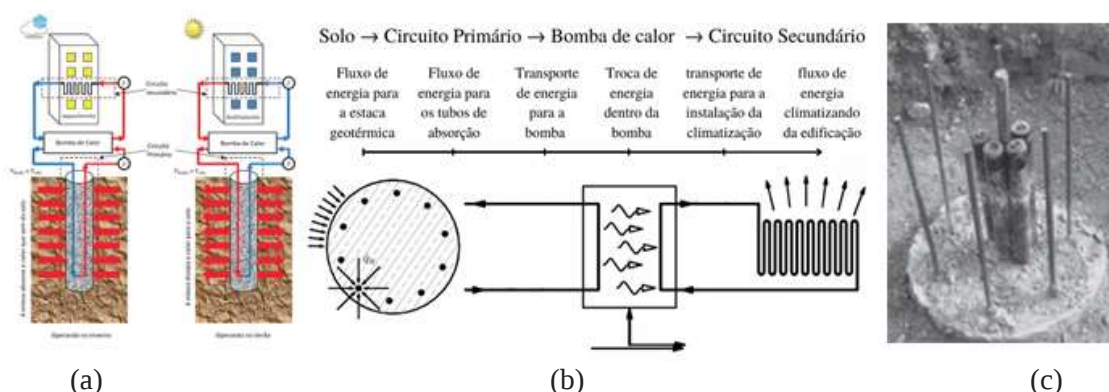


Figura 3 – (a) Esquema das estacas trocadoras de calor e (b) Esquema do fluxo de energia das estacas trocadoras de calor e (c) Dutos de circulação já concretados na estaca.

<sup>2</sup> Termo comercial que, fisicamente, refere-se a troca de energia.

A performance deste sistema geotérmico como agente climatizador está diretamente relacionada às condições térmicas do subsolo, às características da construção (como os materiais construtivos empregados e a demanda energética estabelecida) e às características regionais do local onde esta foi inserida. Embora no Reino Unido, de acordo com Suckling (2009), estipula-se que este sistema atenda bem edifícios de até quatro andares, sabe-se que o clima local e a temperatura média anual do ar do ambiente, assim como o tipo de solo, são exemplos de aspectos influentes na temperatura do subsolo e, conseqüentemente, na quantidade de energia a ser obtida no processo.

Para dar uma melhor ideia do potencial desta ferramenta descreve-se estudos de casos situados na Áustria, país de características distintas às brasileiras. Para sua aplicação no Brasil, sabe-se que o território nacional compõe-se a partir de solos tropicais não saturados, devendo haver então uma investigação minuciosa para apresentar detalhes do contexto local e proporcionar ao Engenheiro condições de projetar tais estacas de acordo com as peculiaridades apresentadas pelo solo em questão.

Dadas estas considerações, apresenta-se na tabela 2<sup>3</sup> três casos de sucesso citados por Brandl (2013)

Brandl (2013) indica que o potencial energético cresce com a profundidade, assim, sistemas de energia situados em pontos mais profundos são mais vantajosos. O autor sugere ainda que o comprimento mínimo para alcançar a viabilidade econômica seja em torno dos 6 m. A figura 4 apresenta uma edificação cujas fundações são compostas por estacas trocadoras de calor, sendo monitoradas durante um ano a fim de comparar sua demanda por climatização e a resposta fornecida pelo sistema empregado.

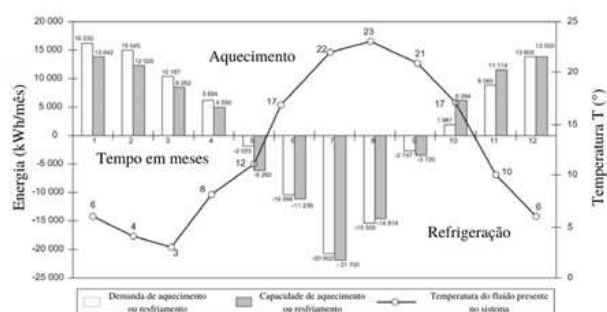


Figura 4 - Demanda e geração de energia para climatização (distribuição anual) de um edifício sobre estacas geotérmicas (Adaptado de Brandl, 2013).

Tabela 2. Economias com a utilização de estacas trocadoras de calor na Áustria.

| Característica Obra | Nº estacas | φ Estacas (m) | Compr. estacas (m) | Econ. CO <sub>2</sub> (ton) | Econ. Energia (GWh/ano) |
|---------------------|------------|---------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Salão de Exposição  | 320        | 0,5           | 18                 | 73                          | 0,94                    |
| Hotel Spa           | 357        | -             | 30                 | 250                         | 3,20                    |
| Centro Comercial    | 650        | 0,9 à 1,2     | 50                 | 550                         | 4,10                    |

Vale destacar os seguintes aspectos relevantes das estacas geotérmicas:

- Ficou evidente a eficácia do sistema quanto a sua competência na promoção de conforto, pois em sete, dos doze meses do ano, a capacidade de aquecimento ou arrefecimento das estacas trocadoras de calor superam as necessidades de climatização da edificação.
- A redução do consumo de energia é uma das principais vantagens deste conjunto, uma vez que reduz a demanda de energia fóssil, e conseqüentemente, as emissões de CO<sub>2</sub>, nos países cuja matriz energética baseia-se nos derivados do petróleo.
- Esta preocupação com as questões ambientais está alinhada também às obrigações internacionais, propostas no Protocolo de Kyoto, 1997.
- Dentre as outras vantagens apresentadas pelas estacas geotérmicas, cita-se seu baixo custo de manutenção e longa vida útil, que, combinadas a capacidade de energia gerada, torna-a econômica a longo prazo, considerando-se vantajoso o investimento inicial de sua implantação.
- Os sistemas de energia geotérmica funcionam de maneira automatizada.

<sup>3</sup> Apresentam-se as ponderações para obtenção dos valores da tabela 2:

1<sup>a</sup> - a equivalência da emissão de uma tonelada de CO<sub>2</sub> para 1164,36 m<sup>3</sup> de gás natural, relação obtida por regra de três a partir dos dados expostos pelo autor.

2<sup>a</sup> - 1 m<sup>3</sup> de gás natural corresponde a uma geração média de 11k Wh de energia (<https://www.elektrum.lv/en/for-home/natural-gas/calculator-for-the-most-suitable-product/>).



- Devido à baixa temperatura e à pressão nos circuitos de transporte de energia, estas estacas podem ser operadas sem oferecer riscos.
- Atenta-se também que o circuito primário fechado de transporte de calor embutido no concreto evita danos nas tubulações ou na poluição das águas subterrâneas. Além disso, a energia geotérmica pode ser combinada com outros sistemas de energia.
- Finalmente, salienta-se que este tipo de energia, diferente da hidrelétrica, não fica à mercê de variáveis, como o regime de chuvas e os tempos de seca.

### 3 Considerações Finais

As considerações finais do presente trabalho estão associadas a proposição de soluções sustentáveis no âmbito da engenharia de fundações e das obras de geotecnia dos temas expostos. Tendo em conta o conceito de sustentabilidade, balanceia-se as vantagens e desvantagens apresentadas por cada método, a fim de avaliar a viabilidade prática e a coerência do mesmo com o tripé do desenvolvimento sustentável. Assim, considera-se um procedimento parcialmente sustentável quando apenas dois critérios do tripé forem atendidos e descartam-se aqueles que forem benéficos a apenas um aspecto. Discute-se então os casos, de acordo com a ordem que foram retratados.

#### (i) Reuso e reciclagem em fundações:

A priori, no que tange ao reuso e reciclagem em Fundações, o estudo de viabilidade “Reaproveitamento de estacas pré-moldadas, como possíveis soluções nas construções de barreiras contra o assoreamento”, Yamamoto; Silva (2016), evidencia uma proposta perspicaz que, além de atender aos interesses socioambientais e econômicos, essenciais para a sustentabilidade, preocupa-se com as necessidades locais. Os dados apresentados mostram uma compatibilidade entre o quantitativo de trechos de estacas inutilizadas, a serem reaproveitadas, e a proporção de material que será preciso para a realização do quebra-mar, revelando-se uma solução viável e passível de execução.

O segundo caso estudado para o mesmo tema, “Estudo do uso de garrafas PET em geotecnia”, por Santos (2005), é encarado sob duas concepções. A primeira, abrange apenas a sustentabilidade proposta. As estacas PET são vantajosas nos três quesitos exigidos, apresentando-se como um projeto benéfico ao meio ambiente e também aos setores socioeconômicos. Todavia, embora possa ser considerada uma fundação profunda sustentável, quando discute-se sua execução prática, as estacas PET ainda carecem de estudos e apresentam limitações que a tornam, atualmente, restritas a casos especiais.

#### (ii) Lama bentonítica:

Mudando de contexto, discute-se a lama bentonítica. Embora os processos de reciclagem e descarte corretos para a lama bentonítica ainda sejam caros, os mesmos são extremamente necessários à sua utilização. As problemáticas apresentadas anteriormente, mostram os perigos advindos do manuseio incorreto desse material ao meio ambiente e à vida humana. Assim, atentando-se aos prejuízos imateriais e à garantia transformação do material em resíduo Classe IIA, propício ao descarte em aterros normais após o tratamento, considera-se ambas as técnicas imprescindíveis. Todavia, elas não são economicamente sustentáveis. Reconhece-se a necessidade de novas pesquisas para reduzir os custos de tais métodos, tornando-os mais comerciais. Infelizmente, a reciclagem apresenta-se parcialmente sustentável em virtude de findar na problemática econômica que, para a maioria das empresas, é fator deliberativo na tomada de decisão.

#### (iii) Estacas geotérmicas:

Finalmente, debate-se a viabilidade de aplicação das estacas geotérmicas, seus prós e contras no que se refere à sustentabilidade e sua necessidade diante do contexto nacional. Sabe-se que a busca por alternativas revolucionárias e sustentáveis tem movimentado diversos setores da engenharia, haja visto a necessidade de reduzir a exploração de fontes de matéria prima já enfraquecidas e o consumo de energia elétrica. Diante destas circunstâncias e tomando por base que o conceito de sustentabilidade prevê a equiparidade dos viés econômico, social e ambiental, as estacas trocadoras de calor apresentam-se como uma solução para atenuar o consumo energético derivado da necessidade de sistemas resfriadores. Assim, do ponto de vista social, este sistema promove qualidade de vida, ao passo que torna as habitações mais confortáveis com sua climatização. Quanto às questões ambientais, sua validação se dá com a redução do consumo de energia, mesmo que não total, a depender das características do solo local, bem como a demanda energética da edificação. Esta mesma



economia energética ratifica sua eficácia econômica, evidenciada pelos altos impostos sobre combustíveis fósseis. Ressalva-se, no entanto, que a eficiência do sistema não é proporcional ao número de estacas adotadas, já que há variáveis envolvidas no processo, tais como as características do solo e do material empregado nas estacas. Embora, suas vantagens sejam indiscutíveis, por ser um estudo ainda pouco explorado no Brasil, tal método carece de dados realísticos quanto a esta economia no território nacional.

A principal preocupação, também advinda da fase inicial em que as pesquisas se encontram, está na reação da peça de fundação e do próprio solo aos ciclos de calor submetidos no processo. Estes estágios periódicos de quente-frio podem provocar dilatação ou retração térmica, que levam ao alongamentos ou encurtamentos das estacas, sendo capazes de provocar esforços estáticos nas superestruturas sustentadas e de reduzir o coeficiente de atrito entre a estaca e o solo. Este, por sua vez, também está sujeito a modificações em sua estrutura graças ao constante congelamento e ressecamento. Salienta-se então que as questões citadas não inviabilizam o uso de estacas trocadoras de calor, apenas evidenciam a necessidade de intensificar as pesquisas sobre as mesmas. É necessário entender o comportamento deste tipo de estaca, bem como o do solo em que ela estará inserida. Um maior entendimento teórico do funcionamento de tal conjunto, e das características locais, permitirá projetar com a devida segurança este sistema, que cumpre também função estrutural.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U. (2010) Reciclagem de lama bentonítica. Fundações e Obras Geotécnicas. Ed. Ruder. v. 1, São Paulo. p 58-60.
- Brandl, H. (2013) Thermo-Active Ground-Source Structures for Heating and Cooling. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013, p. 9-18
- Ciriades, J. P. (2019) Energy Piles Estacas trocadoras de calor. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/energy-piles-estacas-trocadoras-de-calor-jean-pierre-ciriades/?articleId=6593140323076063232>>. Acesso em: 12 out. 2021.
- Empresa de pesquisa energética (2021) Matriz Energética e Elétrica. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 26 out. 2021.
- Morais, T. S. O, Tshua, C. H. C. (2016) Efeito do Carregamento Térmico em Estaca Trocadora de Calor: Estudo de Caso em São Carlos - SP. Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Minas Gerais, p. 1-10, out. 2016. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - ABMS. <http://dx.doi.org/10.20906/cps/cb-04-0115>.
- Salomão, P. E. A. et al (2019). Reuse of residues generated by civil construction: a brief review. Research, Society and Development, 8(10), e268101366.
- Santos, D. B. (2005) Estudo do uso de garrafas PET em geotecnia. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, p. 101-159.
- Straub, E. (2014) Consumo de água na construção sustentável. Disponível em: <[https://www.aecweb.com.br/cont/a/consumo-de-agua-na-construcao-sustentavel\\_8741](https://www.aecweb.com.br/cont/a/consumo-de-agua-na-construcao-sustentavel_8741)>. Acesso em: 23 out. 2021.
- Suckling, T. (2019) Sustainability – What does this mean for the deep foundations industry? Disponível em: <<http://docplayer.net/138251432-Sustainability-what-does-this-mean-for-the-deep-foundations-industry.html>>. Acesso em: 01 set. 2021.
- Yamamoto, E. S. A, Silva, L. V. (2016) Reaproveitamento de estacas pré-moldadas, como possíveis soluções nas construções de barreiras contra o assoreamento. Anais da VII Mostra de Pesquisa em Ciência e Tecnologia DeVry Brasil. Anais. BELÉM: DEVRY BRASIL, 2016. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/viimostradevry/30012-REAPROVEITAMENTO-DE-ESTACAS-PRE-MOLDADAS-COMO-POSSIVEIS-SOLUCOES-NAS-CONSTRUCOES-DE-BARREIRAS-CONTRA-O-ASSOREAMEN>>. Acesso em: 20 set. 2021.