



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL



LETÍCIA MENDONÇA CARDOSO

**SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS ASSOCIADAS À ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES E
GEOTECNIA – ESTUDO DE CASO, REAPROVEITAMENTO DE ESTACAS PARA
CONTENÇÃO**

MACAÉ

2022

LETÍCIA MENDONÇA CARDOSO

**SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS ASSOCIADAS À ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES E
GEOTECNIA – ESTUDO DE CASO, REAPROVEITAMENTO DE ESTACAS PARA
CONTENÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
submetido à Universidade Federal do Rio de
Janeiro – Instituto Politécnico – UFRJ/Macaé,
como parte dos requisitos necessários à obtenção
do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadores:

Prof. Gustavo Vaz de Mello Guimarães, D.Sc.

Prof. Lucas Marques Pires da Silva, Mestrando

MACAÉ

2022

CIP - Catalogação na Publicação

C268

Cardoso, Leticia Mendonça

Soluções sustentáveis associadas às engenharia de fundações e geotécnica – estudo de caso, reaproveitamento de estacas de contenção / Leticia Mendonça Cardoso - Macaé, 2022.

69 f.

Orientador(a): Gustavo Vaz de Mello Guimarães.

Coorientador(a): Lucas Marques Pires da Silva.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Bacharel em Engenharia Civil, 2022.

1. Engenharia civil. 2. Engenharia de fundações. 3. Geotécnica.
4. Sustentabilidade. I. Guimarães, Gustavo Vaz de Mello, orient.
II. Silva, Lucas Marques Pires da, coorient. III. Título.

CDD 624.154

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)
Biblioteca Central do Centro Multidisciplinar UFRJ-Macaé
Bibliotecário: Anderson dos Santos Guarino CRB7 – 5280

LETÍCIA MENDONÇA CARDOSO

**SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS ASSOCIADAS À ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES E
GEOTECNIA – ESTUDO DE CASO, REAPROVEITAMENTO DE ESTACAS PARA
CONTENÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
submetido à Universidade Federal do Rio de
Janeiro – Instituto Politécnico – UFRJ/Macaé
como parte dos requisitos necessários à obtenção
do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Macaé, 08 de Agosto de 2022

BANCA EXAMINADORA



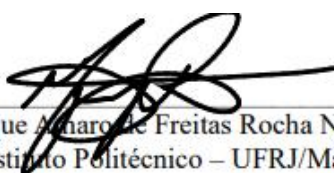
Orientador: Prof. Gustavo Vaz de Mello Guimarães, D.Sc.
Instituto Politécnico – UFRJ/Macaé

<http://lattes.cnpq.br/3614907040658759>



Orientador: Prof. Lucas Marques Pires da Silva, Mestrando
Instituto Politécnico – UFRJ/Macaé

<http://lattes.cnpq.br/5569347731590077>



Prof. Monique Amaral de Freitas Rocha Nascimento, D.Sc.
Instituto Politécnico – UFRJ/Macaé

<http://lattes.cnpq.br/2127043376878064>

DEDICATÓRIA

Ao pai, amigo e exemplo de ser humano, Jorge Luís Cardoso (*in memoriam*). Por ter sido em vida fonte inesgotável de força e ser hoje minha grande inspiração.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus, por me abençoar com sua infinita bondade e me permitir realizar meus sonhos.

Aos meus pais, Jorge (*in memoriam*) e Kátia, pelo amor, dedicação e zelo que destinaram a mim desde que nasci. Todas as minhas conquistas só foram possíveis porque vocês acreditaram, incentivaram e estiveram comigo no processo.

Ao meu irmão, Ramon, e minha cunhada, Mariana, por não medirem esforços para me ajudar e sempre se preocuparem com a minha felicidade e bem-estar.

À minha irmã de alma, Marina, por me compreender, me amparar e fazer minha vida mais feliz.

À Larissa, Vinícius, Mariane e Luane, por me acolherem, me ajudarem em quaisquer circunstâncias e proporcionarem dias maravilhosos dividindo a casa e sendo família.

Aos meus amigos de infância, Thiago, Guilherme e Mariana, por terem crescido comigo e escolhido permanecer, sendo apoio aos momentos mais difíceis e companhia nos mais especiais.

Aos meus meninos de Saquarema, que conheci no ensino médio e sei que nunca vou largar, por me apoiarem incondicionalmente, serem leais e tornarem minha vida mais leve.

Aos meu grupinho “maizomenos” e minhas meninas, por estarem comigo desde o primeiro momento na faculdade, dividindo alegrias e tornando as dores suportáveis por estarmos juntos.

Aos amigos, Kamila Maria e Alexandre, que chegaram depois, mas foram essenciais para enriquecer meu caminho e me impulsionar à concluí-lo, pelos trabalhos e pela diversão juntos.

À Luana e Camila, por se fazerem presentes no meu dia a dia, sendo exemplo de amizade e entendendo minhas ausências enquanto me dedicava ao presente trabalho.

Aos demais membros da minha família e amigos que, embora não citados, estão a todo momento no meu coração, sendo fundamentais para tornar minha vida completa.

Aos meus orientadores, Gustavo e Lucas, por todos os ensinamentos passados, por me fazerem acreditar que sou capaz, me inspirarem a ser uma profissional cada vez melhor e por terem tornado o processo de confecção do presente trabalho uma atividade agradável.

À todo corpo docente da Engenharia Civil de Macaé e em especial à professora Monique, por me acompanhar durante a graduação, sendo orientadora acadêmica e amiga, e ao coordenador de curso, Esdras Oliveira, por ser sempre prestativo e eficiente ao atender meus pedidos acadêmicos.

Aos meus chefes e colegas de trabalho, pelas trocas diárias, pela liberdade para expressar meu ponto de vista e por ser ouvida. Vocês contribuíram para meu crescimento pessoal e proporcionaram o melhor ambiente de trabalho para o meu processo de formação profissional.

*“A verdadeira viagem de descobrimento não
consiste em procurar novas paisagens, mas em
ter novos olhos”. (Marcel Proust)*

RESUMO

A constante evolução do setor tecnológico tornou viável não só a criação de 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 e nas obras de geotecnia, caminha a passos lentos, pois ainda encontra muitas barreiras. Neste sentido, devido à escassez de informações, o presente trabalho busca reunir elementos sobre o desenvolvimento sustentável no âmbito das fundações através de uma revisão bibliográfica de casos publicados, além de um estudo de caso sobre o reaproveitamento de sobras de estacas pré-moldadas de concreto em pequenas contenções de taludes. 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. Entende-se, portanto, o potencial das metodologias apresentadas como agente transformador, ao passo que aproximam a engenharia de fundações e geotecnia dos princípios da sustentabilidade.

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. It is understood, therefore, the potential of the methodologies presented as a transforming agent, as it brings foundation and geotechnical engineering closer to the principles of sustainability.

KEYWORDS: Optimized Resources, Sustainability Tripod, Foundations.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	MOTIVAÇÃO	14
1.2	OBJETIVO GERAIS	14
1.3	OBJETIVO ESPECÍFICOS	14
1.4	METODOLOGIA	15
1.5	ESTRUTURA	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	EVOLUÇÃO DA ENGENHARIA CIVIL NO BRASIL	17
2.2	ANÁLISE DO ÂMBITO DE FUNDAÇÕES NO BRASIL	18
2.3	SUSTENTABILIDADE	19
3	SUSTENTABILIDADE EM FUNDAÇÕES: APLICAÇÕES PRÉVIAS	24
3.1	ESTACAS GEOTÉRMICAS	26
3.1.1	Histórico	26
3.1.2	Funcionamento	27
3.1.3	Aplicações	30
3.1.4	Vantagens	32
3.2	ESTACA PET	32
3.2.1	Generalidades	33
3.2.2	Proposta de aplicação	33
3.2.3	Benefícios	34

	XII
3.3 REAPROVEITAMENTO DE ESTACAS	35
3.3.1 Contextualização.....	35
3.3.2 Argumentação	36
3.3.3 Proposta de aplicação	37
3.3.4 Intervenção.....	39
3.3.5 Benefícios	40
4 ESTUDO DE CASO: REAPROVEITAMENTO DE ESTACAS DE CONCRETO ARMADO.....	41
4.1 EMPREENDIMENTO	41
4.2 LEVANTAMENTO DE DADOS	43
4.3 PROPOSTA DE DESCARTE TRADICIONAL	47
4.4 PROPOSTA DE REAPROVEITAMENTO DAS ESTACAS.....	50
4.4.1 Local estudado	51
4.4.2 Utilização das estacas pré-moldadas como contenção.....	53
4.5 PROPOSTA DE CONTENÇÃO HABITUAL	57
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	59
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
6.1 APLICAÇÕES PRÉVIAS	63
6.2 ESTUDO DE CASO	64
6.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

1 INTRODUÇÃO

A globalização conectou os países através de um fluxo cultural, social e econômico de informações, sendo a internet a principal propagadora deste fenômeno na atualidade. Esta aproximação permitiu a exposição de diferentes perspectivas e a criação de novos questionamentos a cerca de uma preocupação mundial: o meio ambiente. Entendendo a responsabilidade coletiva sobre ele, os debates para sua preservação tornaram-se constantes e expandiram-se às mais diversas áreas da ciência. A engenharia, ao caracterizar-se justamente pelo emprego de técnicas científicas e empíricas na exploração da natureza para proveito humano, não poderia ser isenta deste compromisso. Por tanto, faz-se imprescindível que o setor de construção civil, como parte da engenharia, mantenha uma busca contínua por soluções seguras que conservem os recursos naturais, mas promovam benefícios à sociedade sem comprometer o aspecto financeiro.

A construção civil é um dos campos mais tradicionais da engenharia. Embora novas tecnologias venham ganhando destaque no mercado, como o sistema construtivo *Steel Frame* ou os painéis EPS, o bom e velho concreto ainda é referência quando se pensa em construir. Historicamente, o concreto é o material mais utilizado da construção civil. A demanda contínua e crescente pelo mesmo tornou sua produção responsável por quase 8% das emissões de carbono mundial (Rodgers, 2018). Dentre os principais componentes do concreto está o cimento. Walsh (2020), relata que mais de 4 bilhões de toneladas de cimento são produzidas anualmente, emitindo mais de 1,5 bilhões de toneladas de CO₂. Felix e Possan (2018) atentam ainda sobre a contribuição brasileira nestas emissões, já que o país é um dos notáveis produtores e consumidores de cimento.

Esta dificuldade de disseminação de inovações no setor é ainda maior no âmbito de fundações. Seja pelo receio de arriscar em uma esfera tão importante ou pela carência de pesquisas associadas ao desenvolvimento sustentável, o fato é que a área pouco caminhou em direção à responsabilidade socioambiental ideal. Nota-se então a necessidade de reunir estudos e projetos desenvolvidos e de apresentar propostas alinhadas à temática, a fim de comprovar sua importância e aplicabilidade.

1.1 MOTIVAÇÃO

O tema do presente trabalho foi motivado por uma preocupação antiga da autora quanto às questões ambientais. Ao decidir cursar Engenharia Civil, desejava-se o alinhamento dos futuros projetos com o cuidado à natureza. No decorrer do curso, no entanto, houve uma identificação com a área de fundações e foi possível notar como esta encontrava-se indiferente às preocupações sobre a preservação do meio ambiente.

Incomodada com o distanciamento entre as duas áreas de interesse, tornou-se um objetivo pessoal e profissional aproximá-las. Assim, em conversa com o professor orientador desta obra, Gustavo Vaz de Mello Guimarães, foi recomendada a disciplina eletiva “Tópicos Especiais de Fundações”, ministrada por ele em conjunto com o também orientador e então professor, Lucas Marques Pires da Silva.

A disciplina consistiu em um estudo dirigido através do qual, incentivada e direcionada pelos docentes, a autora pôde conhecer exemplos de aplicações da ideologia sustentável relacionadas a projetos de fundações ou obras de geotecnia. Seguindo esta pesquisa, questionava-se se as propostas vistas poderiam ser otimizadas e desejava-se difundir-las para que mais pessoas tomassem ciência de sua importância, tornando-as inspiração em novos casos.

1.2 OBJETIVO GERAIS

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. Seguindo essa tendência, espera-se proporcionar alternativas que equiparem a engenharia de fundações no Brasil com o tripé do desenvolvimento sustentável, incluindo os aspectos econômicos, sociais e ambientais.

1.3 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Visitar a obra estudada;
- Levantar e analisar os dados registrados in loco;
- Projetar proposta sustentável com auxílio dos Softwares AutoCad e Geoslope;

- Comparar alternativas de solução;
- Determinar viabilidade da sugestão sustentável.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho pode ser segmentada em duas partes: uma revisão bibliográfica e um estudo de viabilidade. Salienta-se que embora haja esta distinção os processos estão intimamente ligados por seu tema de interesse, sendo o primeiro método fundamental ao desenvolvimento do segundo. Deste modo, a priori, buscando demonstrar a possibilidade de equiparar o campo de fundações, dentro da engenharia civil, com o modelo de desenvolvimento sustentável no Brasil, objetivo do presente trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica de casos que incluíssem a temática. A ponderação destas pesquisas e a análise das discussões levantadas por seus respectivos autores permitiu uma reflexão sobre as formas de tornar o setor de fundações e obras de geotecnia mais conscientes no que tange às preocupações globais. Assim, serviram de embasamento teórico para o referido trabalho os seguintes autores:

- CIRIADES (2019);
- MORAIS E TSUHA (2016);
- SUCKLING (2009);
- BRANDL (2013);
- YAMAMOTO E SILVA (2016);
- SANTOS (2005).

Em um segundo momento, impulsionado pelas pesquisas revisadas, foi confeccionado um estudo de viabilidade do reaproveitamento de resíduos de uma obra local para atender uma demanda da própria construção. Esta investigação consistiu em verificar a exequibilidade da proposta baseada apenas na necessidade particular do empreendimento e no quantitativo de material remanescente, exprimindo assim a possibilidade de sanar o problema de forma sustentável. Destaca-se que diversas visitas a obra foram realizadas com as respectivas coletas de dados para o presente estudo de caso. Não era interesse do presente trabalho o dimensionamento do projeto, deixando esta tarefa como sugestão para futuros estudos.

1.5 ESTRUTURA

Organizou-se este trabalho de conclusão de curso em seis capítulos, subdivididos em tópicos conforme suas especificações. O primeiro capítulo trata de uma introdução ao tema, expondo as motivações que levaram à confecção do presente trabalho. São enunciados os objetivos gerais e específicos da pesquisa, além das metodologias utilizadas e das expectativas para os resultados.

O segundo capítulo é uma revisão bibliográfica, contextualizando a atual conjuntura da construção civil no cenário brasileiro e fazendo uma análise dos projetos de fundações do país. Discorre-se ainda a cerca da sustentabilidade, introduzindo conceitos relacionados ao tema e as proposições à nível global ou local. Este, é então correlacionado à construção civil, apontando como a indústria impacta o meio ambiente, a sociedade e a economia, além de evidenciar seu posicionamento diante de tal problemática.

No terceiro capítulo a sustentabilidade é trabalhada no âmbito de fundações, são apresentadas aplicações prévias que demonstram os avanços do ramo no que se refere à consciência socioeconômica e ambiental. Além da revisão bibliográfica de casos associados, evidenciando seus benefícios, são propostas, quando possíveis, intervenções às soluções apresentadas, de forma a otimizar o procedimento para ampliar o campo de aplicação.

O capítulo quatro apresenta o estudo de caso do reaproveitamento de estacas pré-moldadas de concreto armado. Para tal, são apresentadas às especificidades do empreendimento e há um levantamento de dados, elucidando-se a partir disso as propostas de descarte tradicional, do reaproveitamento destes materiais e a possível solução a ser executada na obra.

Já no capítulo cinco, é realizada uma análise de resultados baseada nos dados e informações obtidos. Retoma-se brevemente os casos revisados bibliograficamente e compara-se os métodos apresentados no estudo de caso, a fim de destacar os benefícios e as implicações de cada aplicação sob a óptica da sustentabilidade.

Tem-se então as considerações finais caracterizando o sexto capítulo da obra. Neste, discute-se a respeito do alcance dos objetivos estipulados para a pesquisa e levantam-se hipóteses que ficarão como sugestões para novas pesquisas e futuros trabalhos. Após este, encontra-se uma lista de referências bibliográficas que serviram de embasamento para o presente trabalho de conclusão de curso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Embora a palavra “engenharia” tenha surgido na língua portuguesa por volta do século XVI (CAMPOS, 2014), o termo trata de uma ciência muito mais antiga, que tem sua origem atrelada às primeiras civilizações. Quando analisado o âmbito da construção civil, por exemplo, tem-se o homem, ao abandonar a vida nômade, erguendo abrigos para sua sobrevivência. Assim, pode-se observar que a engenharia civil evoluiu paralelamente à sociedade. Ainda que outrora utilizada para caracterizar qualquer engenharia de cunho não militar, hoje, conceitua-se a área da seguinte forma: “A engenharia civil é o ramo da engenharia que engloba a concepção, o projeto, construção e manutenção de todos os tipos de infraestrutura necessários ao bem-estar e ao desenvolvimento da sociedade.” (BRITOS ENGENHARIA, 2018).

Muitas são as infraestruturas necessárias ao bem-estar e ao desenvolvimento da sociedade. Por isso, a engenharia civil seccionou-se em diferentes áreas de estudo para atender às demandas singulares de cada período e localidade. Atualmente, o campo responsabiliza-se pelos setores da própria construção civil, cálculos estruturais, recursos hídricos, recursos energéticos, orçamento e planejamento, infraestrutura e mapeamento, transporte, saneamento e geotecnia, recebendo este maior foco no presente trabalho.

2.1 EVOLUÇÃO DA ENGENHARIA CIVIL NO BRASIL

O progresso da engenharia no cenário brasileiro tem sua origem com a chegada da família real portuguesa ao país em 1808 e a consequente criação da Real Academia Militar do Rio de Janeiro, que posteriormente veio a se tornar Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (BRITOS ENGENHARIA, 2018). As pesquisas na área não cessaram desde então. Na era Vargas, o país tornou-se referência em concreto armado. Já na década de 1990, considerando às discussões promovidas no contexto mundial, foram criadas as primeiras políticas públicas de preservação ambiental, muito importantes à engenharia civil.

Dado o papel intrínseco da engenharia no cotidiano humano e sabendo como historicamente ela foi essencial ao desenvolvimento das comunidades, é notória a percepção de que a mesma deve continuar evoluindo em concomitância com os avanços sociais. Deste modo, as preocupações e necessidades individuais e globais da contemporaneidade não podem ser

esquecidas por quaisquer engenharias. É, portanto, parte de sua função atender às demandas atuais de forma contínua e inovadora.

2.2 ANÁLISE DO ÂMBITO DE FUNDAÇÕES NO BRASIL

Dentro da engenharia civil, as fundações são elementos estruturais responsáveis pela transferência das cargas da superestrutura para o solo. Visto a sua importância para a sustentação da edificação, é fundamental que esta etapa seja planejada e executada com o máximo cuidado a fim de proporcionar a segurança da construção. Por ser considerada uma das partes mais importantes da obra, a escolha do modelo ideal de fundação leva em consideração diversos fatores como o porte da construção, o solo onde ela será implantada, o acesso ao canteiro de obras e detalhes de logística quanto à disponibilidade local de insumos, mão de obra e equipamentos.

As possíveis soluções para fundações estão separadas em dois principais grupos: fundações superficiais ou profundas. A NBR 6122/1996, Projeto e execução de fundações, atribui ao primeiro tipo as sapatas, blocos, radier, sapatas associadas, vigas de fundação e sapatas corrida. O segundo grupo é composto então por estacas tubulões e caixões. Os conjuntos diferenciam-se tanto pela forma de transmissão das cargas para o solo, quanto por requisitos de profundidade mínima. Ainda segundo a norma, conceitua-se fundações superficiais e profundas respectivamente como:

Elementos de fundação em que a carga é transmitida ao terreno, predominantemente pelas pressões distribuídas sob a base da fundação, e em que a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação. Incluem-se neste tipo de fundação as sapatas, os blocos, os radier, as sapatas associadas, as vigas de fundação e as sapatas corridas. (NBR 6122/1996, p. 2)

Elemento de fundação que transmite a carga ao terreno pela base (resistência de ponta), por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, e que está assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3 m, salvo justificativa. Neste tipo de fundação incluem-se as estacas, os tubulões e os caixões. (NBR 6122/1996, p. 2)

Embora a NBR 6122/1996 indique as diretrizes para projetar e executar fundações no Brasil, infelizmente ela é constantemente ignorada na prática construtiva. Isso porque, para projetar corretamente é necessário realizar investigações geotécnicas que forneçam as

peculiaridades do solo trabalhado. Este é um investimento considerado, erroneamente, desnecessário por muitos construtores. Excluindo este passo, o projeto tende à dois possíveis erros: o superdimensionamento em favor da segurança, que trás prejuízos financeiros, e a escolha incorreta do tipo de fundação ou dimensionamento inábil, que podem causar desde ao colapso da construção, levando a perdas imateriais incalculáveis, até problemas no bom funcionamento da edificação.

Outro problema comum no país é o pensamento sobre fundações rasas serem exclusivamente para obras de pequeno porte e fundações profundas servirem unicamente às obras de grande porte. Em obras de pequeno porte, especialmente às residenciais, na maior parte das vezes, não são realizados projetos e não há um engenheiro responsável pela escolha do método a ser executado. O próprio mestre de obra, baseado em suas experiências prévias, decide *in loco* as dimensões da fundação superficial que irá construir, sendo habitual o uso de sapatas. Em geral, é apenas quando se tem obras de médio a grande porte, pelo maior risco ser expresso visualmente, que a engenharia de fundações começa a ganhar sua devida importância no país. Nota-se, a partir do desapareço com questões que influenciam diretamente a segurança e o bom funcionamento de uma construção, o quão longe a sustentabilidade está de ser uma preocupação do setor.

2.3 SUSTENTABILIDADE

A conscientização sobre os impactos ambientais relacionados às atividades humanas tornou a sustentabilidade uma preocupação da sociedade atual, sendo discutida nos mais diversos setores. Diante desta recente procura por progredir de maneira sustentável, nota-se a necessidade de debater o conceito deste termo. A Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, criada pelas Nações Unidas em 1983, o apresenta 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. Embora designe-se como característica de um processo passível de manutenção, durante determinado tempo, Andersson *et al.* (2010) atenta que a sustentabilidade deve ser encarada a nível regional (vernacular), uma vez que se relaciona com o local da pesquisa e a cultura nele inserida.

Ao ouvir falar de sustentabilidade, é comum associá-la ao cuidado com o meio ambiente. Embora tal associação não esteja incorreta, ela está incompleta. Este engano pode ser justificado pelo contexto em que o termo ganhou notoriedade. Silva (2012) aponta que em 1896, inteirados dos efeitos da industrialização e do aumento da poluição do ar, cientistas já se apresentavam preocupados com a natureza. Todavia, foi em 1972, durante a Primeira Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, em Estocolmo, na Suécia, que essa preocupação virou assunto de discussão entre os principais líderes políticos e difundiu-se com ajuda dos veículos de comunicação. Diante da exposição da fragilidade na relação entre o desenvolvimento, proposto pelo sistema capitalista vigente, e o meio ambiente, a conferência estabeleceu metas de preservação ambiental e desenvolvimento sustentável.

Notou-se então a necessidade de delimitar parâmetros para um desenvolvimento ser considerado sustentável. Ainda que o zelo com a natureza fosse importante, e urgente, as questões sociais e econômicas não poderiam ser excluídas de qualquer debate. Desta forma, em 1994, John Elkington, consultor britânico, estabeleceu a união destas três esferas (ambiental, social e econômica) como o tripé da sustentabilidade, exibido na figura 1, admitindo que a expressão “sustentável” carece do equilíbrio entre as áreas. Em termos de meio ambiente, busca-se a preservação dos recursos naturais bem como a implantação de medidas que minimizem os impactos já estabelecidos. As ações, ao serem planejadas, devem ser pautadas pela responsabilidade ambiental. O pilar social, por sua vez, tem como objetivo promover o bem-estar da comunidade, para alcançar uma sociedade mais justa. Finalmente, tem-se o eixo financeiro, incumbido de avaliar a lucratividade das atividades para determinar a viabilidade de sua execução.

Cabe desacatar que caso a ação atenda à apenas duas esferas do tripé, ela é categorizada de acordo com os aspectos envolvidos. Sendo assim, denomina-se um projeto suportável quando seus benefícios são estendidos às pessoas e ao planeta. Da mesma forma, métodos equitáveis são aqueles que apresentam suas vantagens à sociedade e à economia. A última combinação possível é quando os prós de uma atividade são destinados ao meio ambiente e ao setor financeiro, sendo esta considerada viável.



Figura 1 Tripé da Sustentabilidade (Giovanelli, 2015)

A demanda por conferências para tratar do desenvolvimento sustentável não acabou em Estocolmo. Ao longo dos anos, países desenvolvidos e subdesenvolvidos travaram impasses a respeito do modelo ideal de desenvolvimento. Costa, 2021 aponta que em 2015, inspirados nos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), a Assembleia Geral das Nações Unidas (AGNU), formada pelos 193 Estados-membros da ONU, criou objetivos e metas globais, que devem ser alcançados até 2030, chamados de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Esperava-se, com os ODS, além de dar continuidade aos avanços na redução da pobreza global e na melhoria ao acesso à educação e à água, promovidos pelo ODM, que cada país pudesse traçar também suas próprias metas, de acordo com as particularidades e necessidades de suas culturas. Os 17 principais objetivos da ODS exemplificados na figura 2.



Figura 2 Objetivos do desenvolvimento sustentável (Costa, 2021)

Como é possível observar, os temas presentes nos ODS atendem aos três âmbitos da sustentabilidade pois abrangem as necessidades humanas, como saúde, educação, justiça e qualidade de vida, incluem as soluções para os problemas ambientais, com a preservação do meio ambiente, combate ao desmatamento, proteção da fauna e da flora, uso consciente dos oceanos e combate às mudanças climáticas, sem esquecer das questões econômicas envolvidas no consumo de energia, no uso e esgotamento de recursos naturais e na produção de resíduos, por exemplo.

A construção civil não pode ficar alheia às discussões sobre sustentabilidade. O setor, que gera milhares de empregos e movimenta a economia mundial, também é responsável por emitir quase 40% do CO₂ do planeta (UN ENVIRONMENT PROGRAMME, 2020). O SINDUSCON, Balneário Camboriú (2021), discorre acerca dos impactos ocasionados pela geração de resíduos da construção civil e a consequente concepção de áreas degradadas em três etapas do processo construtivo: na obtenção de materiais, em que há retirada de matéria prima natural e produção de itens, na execução de obras civis e na disposição final dos resíduos gerados pela construção em si.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabeleceu, em 2002, a resolução 307, que estipula diretrizes para a gestão dos resíduos da construção civil, classificando-os e determinando que seus geradores deveriam priorizar a não geração de novos resíduos, além da reciclagem, e comprometer-se com a disposição final sobre o que já foi gerado. Infelizmente, tal resolução é comumente ignorada na prática construtiva, pois, ainda segundo o SINDUSCON (2021), poucos são os produtores que se preocupam com a não produção de resíduos ou priorizam sua reciclagem.

Embora já existam algumas práticas sobre a reutilização dos resíduos de construção e demolição, como, por exemplo, tijolos e blocos de cimento confeccionados com materiais reciclados, a maior parte desses são apenas descartados sem nenhum cuidado especial. Oliveira *et al.* (2018) assinala sobre a correlação, no Brasil, entre a disposição irregular dos materiais advindos de processos construtivos e a ocorrência de enchentes, a perda de infraestrutura de drenagem por entupimento de galerias e assoreamento de canais, além da proliferação de vetores, da poluição e do aumento desnecessário dos custos da administração pública.

A Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON), aponta que 98% dos entulhos gerados diariamente pela indústria da construção civil no país poderiam ser reciclados. Todavia, apenas 21% destes, que correspondem a cerca de 290,5 toneladas de entulho, passam por algum processo para reutilização (Faria, 2019).

Analisando esta problemática, destaca-se a importância dos temas abordados no presente trabalho: a reutilização de materiais construtivos em fundações, apresentando formas de reutilizar fundações ou de confeccioná-las a partir de material reaproveitado.

A construção civil gera resíduos desde a preparação do terreno que irá receber a edificação até as etapas finais da concepção do edifício. Reformas e demolições também contribuem na produção de entulhos. 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). Dadas estas proporções, o reaproveitamento de resíduos de construção civil como matéria prima para a geração de novos produtos para o setor é uma tendência a ser cada vez mais explorada.

Todavia, os caminhos para essa exploração podem ser distintos, uma vez que há variáveis a serem consideradas, tais como o tipo de resíduo a ser reaproveitado, a tecnologia para reaproveitá-lo e seu destino. Não há uma fórmula certa que garanta o sucesso do procedimento, mas considera-se a priorização pela reutilização desses materiais como solução de problemas locais um ponto relevante no que tange a sustentabilidade. Isso porque, quanto mais próximos os materiais estão de seu depósito, menos combustível é gasto com seu transporte e menos gás carbônico é expelido na atmosfera, por exemplo.

Atualmente, há algumas limitações na reciclagem brasileira de resíduos da construção civil. Sua realização depende de uma grande quantidade de material a ser reaproveitado, embora isso não seja um problema, haja visto a quantidade de detritos gerados pela indústria. Ademais, Salomão *et al.* (2019), também aponta que os produtos gerados pela reciclagem do RCC não têm função estrutural, sendo os fins mais comuns, advindos desta reciclagem, os agregados para argamassas, concreto, assentamento, revestimento, fabricação de pré-moldados (meio fio, pavers, blocos). O presente trabalho busca então apresentar alternativas para a reutilização de resíduos, discutindo a viabilidade de seu emprego em obras de geotecnia ou no âmbito da engenharia de fundações.

3 SUSTENTABILIDADE EM FUNDAÇÕES: APLICAÇÕES PRÉVIAS

Se a sustentabilidade ainda é pouco explorada na construção civil como um todo, ela torna-se ainda mais desafiadora no âmbito das fundações. Seja pelo medo de arriscar em uma área tão importante ou pela carência de pesquisas de soluções para o setor, o fato é pouco foi encontrado na literatura sobre esse assunto. Tem-se como exemplo a reutilização de canos de aço como fundações profundas, proposta por Carvalho e Furukawa (2011). O aço é um material ferroso e de modo geral, possui grande potencial de reciclagem. Isso porque os perfis feitos de aço são fabricados obedecendo a um padrão, onde existem diversos tipos de limites de elasticidade. Além dessas características, os produtos de aço apresentam alta resistência, o que significa que muitos podem ter uma longa vida útil e ser reutilizados diversas vezes.

Quando apresentadas como estacas tubulares, os produtos do aço, com sua alta resistência, mostram-se capazes de atravessar a maioria das obstruções naturais e artificiais. Neste estudo de caso, tem-se a exemplo a empresa *Green Piling*, que instala estacas tubulares de aço usando a mesma plataforma das estacas pré-moldadas. Estas estacas, utilizadas pela empresa e visualizadas na figura 3, são na verdade tubos de aço, recuperados principalmente das indústrias de petróleo e gás, com comprimentos de até 14m, estando disponíveis em extremidade aberta de 140 mm até 762 mm de diâmetro (Carvalho e Furukawa, 2011). Melo *et al.* (2018), expõe o setor petrolífero como um grande gerador de resíduos, os quais são extremamente poluentes para o meio ambiente por serem tóxicos, evidenciando assim a necessidade de preocupar-se com a deposição dos instrumentos utilizados na exploração deste combustível quando sua vida útil neste processo termina.



Figura 3 Canos de aço reaproveitados pela empresa *Green Piling* como estacas de fundações.
(CARVALHO; FURUKAWA, 2011)

Outro exemplo de sustentabilidade em fundações seria a reciclagem e o tratamento para descarte da lama bentonita. Conhecida como lama de perfuração, ela é composta, basicamente, por água e a uma mistura de argila. Sua principal utilização na engenharia de fundações é proporcionar mais sustentação ao solo em escavações. Embora tal material tenha ampla utilização e seja empregado há vários anos, ela necessita de cuidados.

Graças à sua densidade, a lama pode provocar diminuição da permeabilidade do solo e, conseqüentemente, a extinção de alguns seres da fauna e da flora. Outro perigo do descarte incorreto é a mudança do curso d'água, tornando o solo improdutivo e impedindo a oxigenação de rios. Ademais, salienta-se que as reservas de bentonita são finitas.

Ressalta-se também a questão social, que ocorre em dois aspectos. O primeiro é quanto à saúde dos trabalhadores que manuseiam a lama bentonítica. Por ser um produto em pó, o manuseio incorreto acarreta o surgimento de problemas respiratórios por exposição prolongada. Mota (2010) atenta ainda que o produto pode causar leve irritação nos olhos. 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, conseqüentemente, 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 ela seja reutilizada. Todavia, o processo não pode ser feito continuamente. Alonso (2013) indica que, após algum tempo, necessita-se descartá-la. A lama precisa então ser tratada para ser lançada em aterros normalmente utilizados para o descarte, pois por seu potencial impermeabilizante, ela não atende à classe IIA da NBR 10004 (caracterizados por propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água).

Outros temas importantes, que já foram estudados no que diz respeito a sustentabilidade em fundações e obras de geotecnia, são o reaproveitamento de materiais utilizados em fundações e a implementação de novas tecnologias para sua reutilização. Estes ganharão maior destaque no presente trabalho com uma revisão bibliográfica de casos sobre estacas geotérmicas, estacas pet e o reaproveitamento de estacas pré-moldadas de concreto. Através do Google Acadêmico, realizou-se uma seleção de documentos que estivessem relacionados à sustentabilidade em fundações, na construção civil. Por ser um assunto ainda pouco destacado no Brasil, a pesquisa reuniu também fontes de outros países. Para exploração da temática das estacas geotérmicas, foram analisados os trabalhos de Ciriades (2019), Morais e Tsuha (2016),

Suckling (2009) e Brandl (2013). Já para a o estudo sobre reuso e reciclagem em fundações, foram selecionados os trabalhos de Yamamoto e Silva (2016) e Santos (2005).

3.1 ESTACAS GEOTÉRMICAS

A exploração do potencial do solo como fonte de energia é uma atividade de origem pré-histórica. Os ancestrais utilizavam o calor advindo da terra para seu próprio aquecimento ou para o preparo de alimentos. Com o passar do tempo, tal matriz teve sua importância subestimada em prol da geração a partir dos combustíveis fósseis. Todavia, esta, por não ser renovável, já apresenta sinais de fadiga. Deste modo, cientistas notaram a necessidade de revisitar o passado a fim de reinventar as formas de aproveitar as propriedades caloríficas do solo para uma demanda atemporal: a climatização.

Pesquisas recentes mostram que a modalidade geotermal não é a única forma recorrer energia a partir do solo. A Polar Night Energy, uma startup finlandesa, utiliza uma areia de baixa qualidade como principal matéria prima de uma bateria que pode conservar energia durante meses. Segundo Souza (2022), o sistema, que consiste basicamente em aquecer a areia a 500 °C e utilizar sua excelente capacidade química e física de reter calor, vem sendo proposta para o aquecimento durante o inverno quando, países que sofrem com a estação bem definida, tem um crescimento de sua carência energética pela ampla utilização de aquecedores.

Esta premissa de usar o solo como agente para a climatização de edificações serve também como princípio para as estacas geotérmicas, que são discutidas presente neste capítulo. Tendo em vista a dedicação aplicada à descoberta de novas maneiras de utilizar a energia provinda do solo, contextualiza-se brevemente o histórico energético brasileiro. Objetiva-se assim, corroborar com a exposição da necessidade de investir na aplicação de fontes alternativas, como as referidas estacas geotérmicas.

3.1.1 **Histórico**

Analisando o contexto histórico do país quanto às suas matrizes energéticas, destaca-se que a vasta extensão territorial brasileira e sua localização geográfica tornaram o país um grande consumidor de energia elétrica. Todavia, salienta-se que estas mesmas condições potencializam sua capacidade de gerar energia a partir de fontes renováveis. Em 1983 foi instalada, em Minas

Gerais, a primeira central hidrelétrica no Brasil. No ano seguinte, houve a inauguração da Usina de Itaipu, em Foz do Iguaçu, que durante 20 anos sustentou o título de maior barragem do mundo. Esta facilidade de aproveitamento da força das águas para gerar eletricidade, graças às topografias regionais, transformaram as hidrelétricas na principal matriz energética brasileira e acomodaram, durante anos, os investimentos apenas neste setor.

As mudanças climáticas mundiais, o aumento das temperaturas e as variações no regime de chuvas, alinhados ao crescente consumo de eletricidade, conduziram o Brasil para uma crise hídrica que evidenciou a necessidade de diversificação da sua matriz energética. BEN, 2021, já apresenta esta mudança para o ano de 2020, embora não de forma ideal. O petróleo e seus derivados estão em primeiro lugar, representando 33,1% da matriz atual e seguida pelos derivados da cana de açúcar, sendo estes 19,2%. A energia hidráulica corresponde a apenas 12,6% da produção energética nacional, embora ainda seja líder da matriz elétrica, formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021).

O Brasil não é o único a enfrentar o colapso energético, nações do mundo todo estão sofrendo deste mal e, apesar dos motivos serem distintos, todos resultam no aumento do preço da energia. Todavia, países europeus, que não desfrutam do mesmo favorecimento geográfico brasileiro, há anos atentam-se à criação ou exploração de outras fontes alternativas de energia, como é o caso da energia solar, eólica e geotérmica. Esta última pode ainda ser aproveitada de duas formas: através do uso da energia térmica a grandes profundidades e temperaturas, para a produção de eletricidade a partir da água quente e vapor ou, para pequenas profundidades, com o uso das estacas trocadoras de calor, Energy Piles, que são tema de estudo do presente trabalho.

3.1.2 **Funcionamento**

As estacas trocadoras de calor, ou Energy Piles, são capazes de climatizar edifícios por meio de sistemas trocadores de calor inseridos no solo (geotérmico), detalhados na figura 4. Brandl (2006) 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) 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.

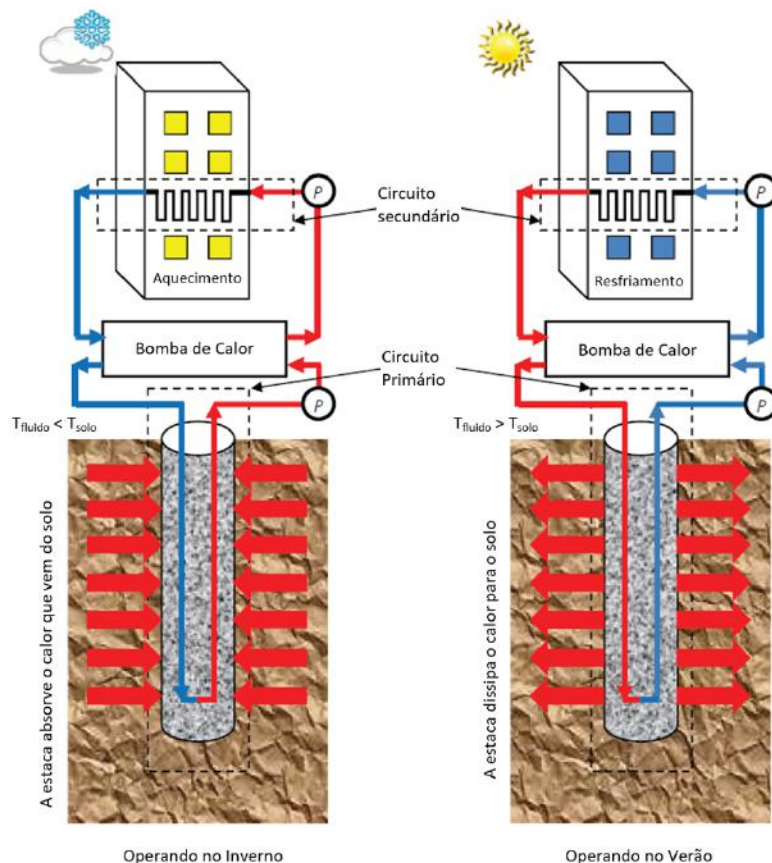


Figura 4 Esquema Geral das Estacas trocadoras de calor (CIRIADES, 2019)

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. Tem-se então o solo comportando-se de maneira distinta em épocas frias e quentes. 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. Conforme a figura 5, pode-se conferir a relação inversamente proporcional entre a temperatura no solo e no ar.

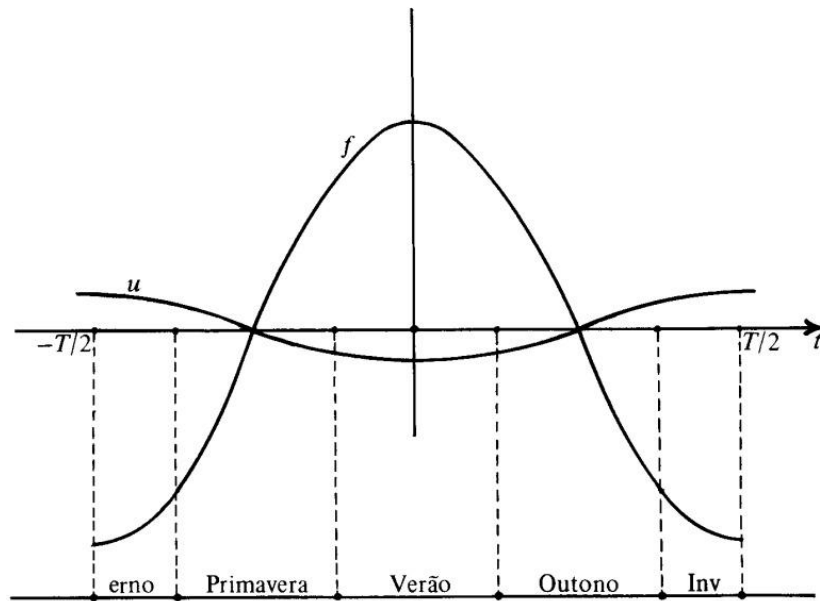


Figura 5 Relação de temperatura no solo e no ar. (FIGUEIREDO, 1977)

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 partir da figura 6, pode-se conferir a disposição dos tubos antes e após a concretagem da estaca.

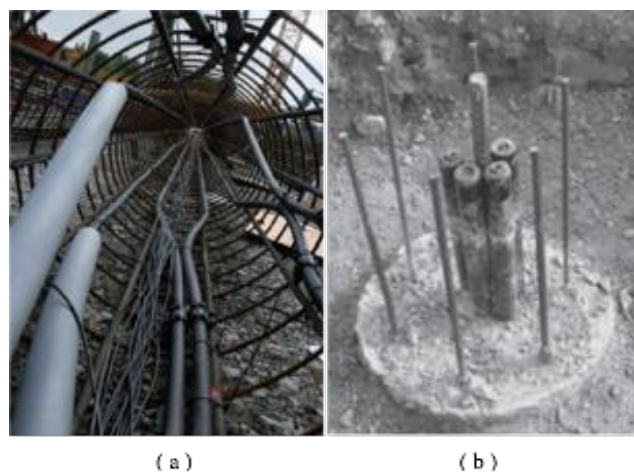


Figura 6 (a) Dutos de circulação instalados na armadura da estaca; (b) Dutos de circulação já concretados na estaca. (CIRIADES, 2019)

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.

No Reino Unido, de acordo com Suckling (2009), estipula-se que este sistema atenda bem edifícios de até quatro andares. Todavia, sabe-se que o clima local e a temperatura média anual do ar do ambiente, assim como o tipo de solo, que inclui suas características mineralógicas, são exemplos de aspectos influentes na temperatura do subsolo e, conseqüentemente, na quantidade de energia a ser obtida no processo. Assim, salienta-se que o trabalho abordado a seguir descreve estudos de caso situados na Áustria, país de características distintas às brasileiras.

Para sua aplicação no Brasil, menciona-se que o território nacional é composto 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.

3.1.3 Aplicações

Dadas estas considerações, apresenta-se na tabela 1 três casos de sucesso citados por Brandl (2013). Algumas ponderações foram feitas para a composição da referida tabela, sendo a primeira delas a equivalência da emissão de uma tonelada de CO₂ para 1164,36m³ de gás natural, relação obtida por regra de três simples a partir dos dados expostos por Brandl (2013). A outra aproximação utilizada foi feita de acordo com a empresa Elektrun, apontando que o metro cúbico de gás natural corresponde a uma geração média de 11kWh de energia. Assim, manipulou-se os dados a fim de permitir uma melhor visualização dos casos diante dos mesmos parâmetros. Salienta-se ainda que não é desejo a realização de uma comparação entre os casos, visto que não estão explicitados fatores importantes à eficiência energética do método, como por exemplo o tipo de solo em que o sistema está inserido e as particularidades do clima local.

Característica da Obra	Número de estacas	Diâmetro das Estacas	Comprimento médio das estacas	Economia de CO2	Economia de Energia
Salão de Exposição	320	0,50 m	18,00 m	73 t	0,9 GWh/ano
Hotel Spa	357	Não informado	30,00 m	250 t	3,2 GWh/ano
Centro Comercial	650	0,9 m à 1,2 m	50,00 m	550 t	4,1 GWh/ano

Tabela 1 Utilização de estacas trocadoras de calor na Áustria

Brandl (2013) indica que não há limites de profundidade para a instalação das estacas no que se refere ao funcionamento do sistema de absorção de energia. Pelo contrário, 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 6m. Analisa-se o gráfico exposto na figura 7, em que uma edificação, cujas fundações são compostas pelas estacas trocadoras de calor, foi monitorada durante um ano a fim de comparar sua demanda por climatização e a resposta fornecida pelo sistema empregado.

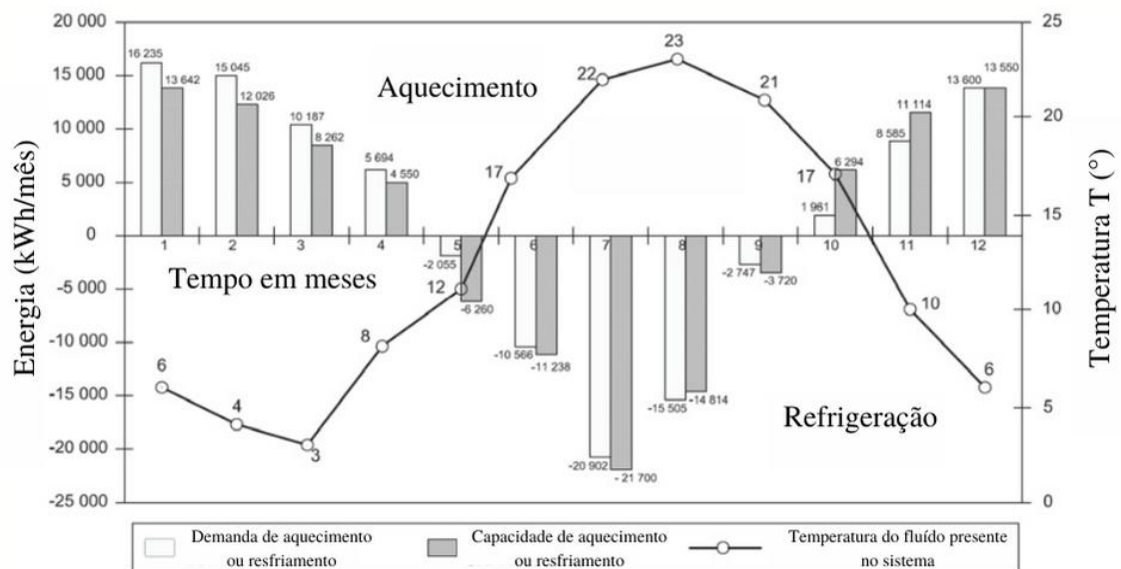


Figura 7 Demanda e geração de energia para climatização (distribuição anual) de um edifício sobre estacas geotérmicas (Adaptado de Brandl, 2013).

A eficácia do sistema quanto a sua competência na promoção de conforto térmico é comprovada ao verificar a figura 7. 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 estudada. Salienta-se ainda que em dezembro há um nivelamento nesta relação e que, mesmo nos meses em que a energia proporcionada pelas estacas não supre a demanda, sua utilização ainda pode ser considerada satisfatória pois possibilita a redução do consumo.

A redução do consumo de energia é uma das principais vantagens deste conjunto, uma vez que reduz a demanda de energia fóssil, e consequentemente, as emissões de CO₂ 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.

3.1.4 **Vantagens**

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. Além disso, os sistemas de energia geotérmica funcionam de maneira automatizada. 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 e que 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.

3.2 ESTACA PET

Santos (2005) apresenta um estudo do uso de garrafas PET para a confecção de estacas em obras de fundações e geotecnia. Este trabalho surgiu a partir de uma das maiores preocupações dos ambientalistas da atualidade: a reciclagem de materiais de difícil degradação.

Dentre estes produtos de difícil degradação, a garrafa PET destaca-se pela sua utilização em larga escala no cotidiano, impulsionada pela indústria de bebidas.

3.2.1 **Generalidades**

O Brasil é um dos líderes na reciclagem de garrafas PET e, segundo Marçon (2021), chega a reciclar 55% das embalagens descartadas. Em termos de volume, esta porcentagem representa 311 mil toneladas de produto. Embora haja uma considerável taxa de reciclagem para as garrafas PET, é válido ressaltar que também há um crescimento na produção de tais produtos. Pode-se atribuir a este fato o avanço do serviço de entrega em domicílio com a pandemia do COVID-19, que utilizam as garrafas plásticas por serem mais fáceis de manusear e transportar.

Os impactos deste aumento da produção podem ser mitigados com novas formas de reciclar estas garrafas. Assim, destacando-se a elevada durabilidade destes materiais, que chegam aos 450 anos e sua alta resistência à tração, propõe-se a utilização das garrafas PET em obras de contenção e fundações, sendo a última, denominada estaca PET, o objeto de estudo do presente trabalho. Do ponto de vista ambiental, a aplicação dos materiais recicláveis reduz a exploração das jazidas de materiais de construção. Outra questão a ser analisada diz respeito à disposição do lixo. Quanto mais longe esta for feita, maior será o custo. Ignorando a reciclagem, apenas transfere-se o problema de lugar, sem resolvê-lo, o que não é benéfico.

3.2.2 **Proposta de aplicação**

Para a confecção das estacas PET, são utilizadas garrafas do material, no volume de dois litros, 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. Uma vez que as garrafas têm em torno de 0,30m de altura, para uso em fundações, elas são acopladas buscando alcançar profundidades que condicionem melhores capacidades de carga.

O processo executivo, desenvolvido por Santos (2005) segue um passo a passo que se inicia com o corte da parte superior da garrafa. Em seguida, faz-se o preenchimento com apiloamento ou vibração com areia, deixando um trecho de 50mm para encaixe da próxima

garrafa. Para auxiliar neste encaixe, deve-se utilizar uma fita plástica adesiva (típica de embalagens) de largura igual a 50mm. O procedimento é replicado na vertical até que se atenda a profundidade de projeto. Com o término da confecção da estaca, é feita sua introdução em um tubo de PVC, diâmetro 125mm. O fuste pode ser escavado a trado manual, no diâmetro 150mm e para lastro de fundo, deve ser utilizado um concreto magro, com 100mm de espessura, lançado e apilado da superfície.

O tubo de PVC com a estaca é então introduzido no fuste, sendo as garrafas fixadas por um arame amarrado no extremo superior, passando pelo interior do tubo, contornando a última garrafa e voltando ao extremo superior. Após apoiada no concreto magro, a estaca é comprimida manualmente, para penetração de cerca de 50mm da base da última garrafa no lastro de concreto. O arame no extremo superior do tubo de PVC é solto para que o tubo possa ser sacado manualmente do fuste. O arame deve ser abandonado no fuste. Para preenchimento do vazio lateral é sugerido o lançamento manual de areia. A facilidade para a confecção deste tipo de estaca dispensa a necessidade de mão de obra especializada, permitindo sua aplicação como solução de fundação em edificações com baixas solicitações e em que há escassez de recursos. Este processo executivo é demonstrado na figura 8.

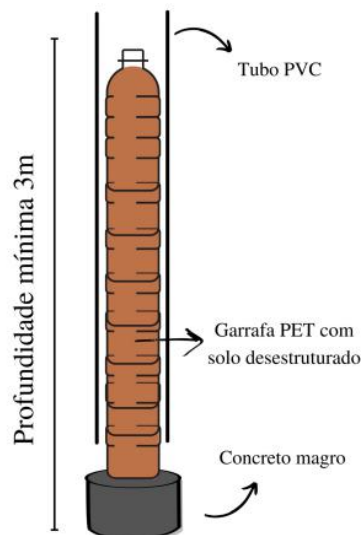


Figura 8 Detalhe construtivo da Estaca PET (Autora)

3.2.3 Benefícios

Neste estudo, 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.

Os inconvenientes que as envolvem, por outro lado, são sua indicação para obras de pequeno porte, transmitindo apenas 10kN por estaca. Além disso, pelas características do material, esta estaca teria grande deformabilidade. A alternativa sugerida pelo autor para melhoria da capacidade de suporte do sistema PET foi o uso de grupos de estacas. Este procedimento proporciona incremento satisfatório e aplicabilidade numa gama maior de casos práticos de construção. Ainda sim, compreende-se que este é um estudo preliminar que tem como premissa apresentar uma proposta alternativa para fundações de obras de pequeno porte, considerando a viabilidade técnica e financeira envolvidas.

3.3 REAPROVEITAMENTO DE ESTACAS

Considerando a insustentabilidade da manutenção da relação entre a indústria de construção civil e o meio ambiente no que tange à geração de resíduos, constata-se a imprescindibilidade de conceber projetos a partir da reutilização de materiais do setor. Reitera-se a alta qualidade que estes insumos possuem, por terem sido idealizados para resistir aos esforços pertinentes à construção. Em posse destas informações, discorre-se a respeito do estudo de viabilidade intitulado “Reaproveitamento de estacas pré-moldadas, como possíveis soluções nas construções de barreiras contra o assoreamento”, Yamamoto e Silva (2016).

3.3.1 **Contextualização**

Nesta análise, parte-se da observação das seguintes problemáticas do cotidiano: o assoreamento e a erosão que agredem a Praia de Marahú, localizada na Ilha de Mosqueiro - Belém, e o quantitativo das sobras de estacas de obras de fundações, aliada a não existência de um projeto adequado de reciclagem das mesmas, como mostra a figura 9. Contribuíram com a apresentação do tema moradores locais, através de depoimentos coletados, e antigas mídias impressas, que forneceram dados para análise.



Figura 9 Sobras de estacas sendo descartadas – Ilha do Mosqueiro, Belém (YAMAMOTO E SILVA, 2016)

A Praia de Marahú localiza-se a aproximadamente 70km de Belém, sendo parte da Ilha do Mosqueiro. A área, banhada pela Baía do Marajó, possui águas doces e ondas, atraindo muitos turistas com suas belezas naturais. Além disso, salienta-se que Yamamoto e Silva (2016) discorrem que Belém possui solo aluvionar e de camadas argilosas cuja conformação é apropriada para utilização de estacas pré-moldadas como elementos de fundação.

3.3.2 **Argumentação**

Trata-se de uma região sem grande desenvolvimento econômico, como mostra a figura 10, sendo o turismo sua principal fonte de renda. Este, por sua vez, está prejudicado pelas constantes erosões marítimas acometidas no local, que invadem a faixa de areia, chegando às ruas. Estas prejudicam não somente visitantes, mas também os moradores ao passo que dificultam o transporte na região, obstruindo as vias. Além disso, este avanço da água, por vezes, chega às casas e barracas, causando transtornos e prejuízos aos que ali residem.



Figura 10 Diferentes ângulos da Praia do Marahú, Belém (Google Maps, 2021)

Para solucionar este problema, propõe-se a utilização das sobras de estacas pré-moldadas de concreto, disponíveis nas proximidades, para a confecção de um quebra mar que combata a ação da força das águas. Estima-se, pela maior empresa de fundações de Belém, a confecção de dez mil peças de estacas pré-moldadas de concreto no ano de 2014.

3.3.3 Proposta de aplicação

A solução pretendida consiste em quantificar os trechos de estacas pré-moldadas que estão sendo descartados anualmente em Belém e, ciente desta magnitude, explicitar a viabilidade do uso do material para a confecção de um quebra-mar para a região de um importante ponto turístico. A hipótese adotada no trabalho considera estacas 12 metros de comprimento e parte do pressuposto que os trechos de estacas maiores que 3 metros podem ser reaproveitados em outros pontos como fundação.

Elaborou-se então a tabela 2, apresentando o desperdício em termos de material e financeiro de acordo com a SINAPI para a localidade Belém – PA. Para chegar à metragem total de estacas, tomou-se por base 5000 sobras, considerando que em um ponto de estaca em projeto, são utilizados em média duas peças e que foram produzidas 10000 estacas em 2014. Multiplicou-se então este valor por 3 m, dada a consideração anterior sobre a reutilização. Utilizou-se como base os custos desonerados de dezembro de 2014 e depois, maio de 2021, para expor os valores corrigidos para os dois tamanhos de peças disponíveis.

Descrição do Item	Total	Preço médio por metro		Preço médio total	
		2014	2021	2014	2021
Estaca concreto pré-moldado, seção quadrada, inclusive emendas, capacidade 25 tf	15000 m	R\$ 73,91	R\$ 68,69	R\$ 1.108.650,00	R\$ 1.030.350,00
Estaca concreto pré-moldado, seção quadrada, inclusive emendas, capacidade 50 tf	15000 m	R\$ 107,72	R\$ 87,61	R\$ 1.615.800,00	R\$ 1.314.150,00

Tabela 2 Estimativa de desperdício anuais com as sobras de estacas. (Autora)

Novamente, utilizando como fonte de dados a SINAPI para a localidade Belém - PA, confeccionou-se o gráfico exibido na figura 11, explicitando a variação dos custos unitários das estacas estudadas na tabela 2 com o passar dos anos. Como a composição de tais itens sofreu alterações a partir do ano de 2015, passando a não contemplar mais a cravação da peça e estando responsável apenas pelo seu fornecimento, foi necessário equiparar as condições apresentadas nos anos analisados.

Para tanto, averiguou-se a redução de valores entre o último ano que incluía a cravação (2015) e o primeiro ano que suprimiu esse processo (2016), gerando uma porcentagem, correspondente aos custos do procedimento, a ser descontada nos valores unitários das estacas para os anos anteriores à mudança. Outra observação a ser feita é quanto ao avanço do processo produtivo das peças. Houve uma substituição das formas tradicionais de madeira por formas metálicas, que podem ser reaproveitadas mais vezes, barateando o processo.

As dimensões explicitadas na tabela 2 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 do gráfico da figura 11 também corrobora essa proposição. Nota-se que, embora o mercado tenha passado por momentos de baixa, o custo dos itens estudados cresce novamente a partir do ano de 2018.

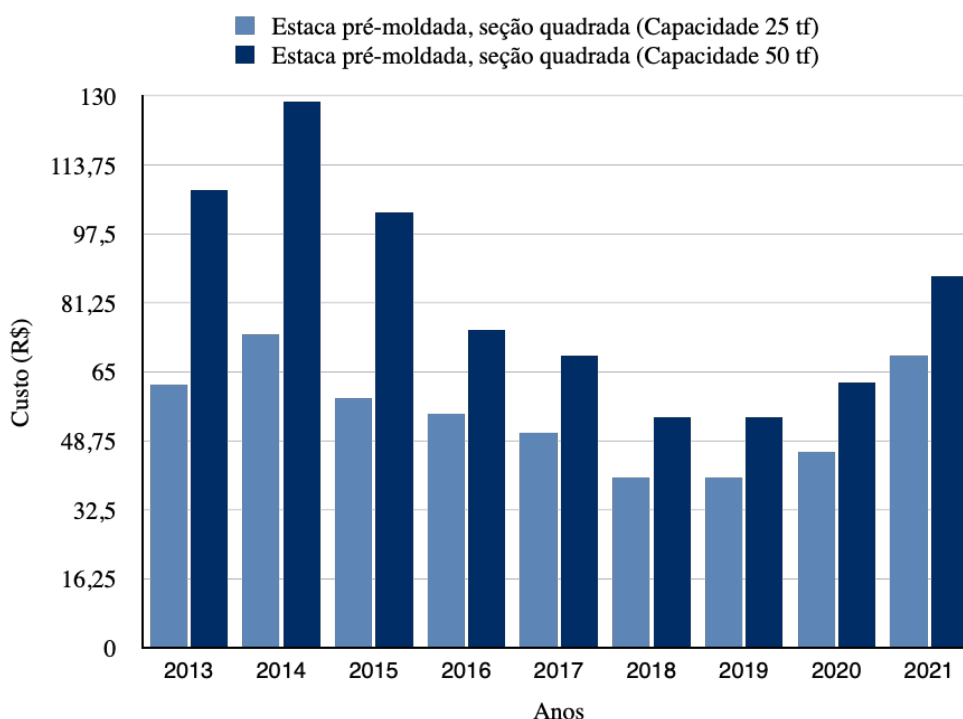


Figura 11 Variação dos custos das estacas entre os anos de 2013 e 2021 para estacas pré-moldadas de concreto com capacidade de 25tf ou 50tf. (Autora)

Os autores orientam então o agrupamento das estacas reaproveitadas em blocos formados por segmentos de 9 unidades, com comprimento médio de 3 metros. Para esta associação utiliza-se geogrelhas ou cabos de aço. Os conjuntos serão então içados por meio de guindaste sobre a balsa no fundo do rio, simulando um quebra mar. Salienta-se que a reutilização destas estacas é uma proposta de solução provisória, que carece de observação e manutenção, mas que pode satisfazer as necessidades locais.

3.3.4 Intervenção

Para a aplicação destes pedaços de estacas na confecção de quebra mares, sugere-se a adição de uma etapa prévia ao processo planejado pelos autores. 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, deve-se fazer uma inspeção a fim de selecionar as estacas em melhor condição para serem utilizadas.

A princípio, esta etapa compreenderia uma inspeção visual, descartando armadura exposta e desagregação. As estacas que passassem pela inspeção visual seriam avaliadas com o auxílio de um fissurômetro. Este instrumento é uma régua transparente destinada a medir

fendas e fissuras. Ele apresenta um baixo valor de aquisição, custando aproximadamente vinte reais e estando em coerência com o aspecto econômico do tripé sustentável.

Com o auxílio do instrumento, medem-se as fissuras transversais e, segundo Gonçalves *et al.* (2007), aquelas inferiores a 1 mm, não são preocupantes quando as fissuras (ou pelo menos 85% delas) não ultrapassam: 0,4 mm, para estacas não protegidas e cravadas em meio de agressividade ambiental fraca; 0,3 mm, para estacas não protegidas e cravadas em meio de agressividade ambiental moderada e forte ou 0,2 mm, para estacas não protegidas e cravadas em meio de agressividade ambiental forte.

3.3.5 **Benefícios**

No caso analisado, destacam-se alguns pontos. No âmbito ecológico, há o reaproveitamento de materiais que seriam descartados, muitas vezes incorretamente. Além disso, a proposta evita a extração de novos materiais e a liberação de CO₂, ao passo que não é necessário o transporte a longas distâncias.

Contudo, a desvantagem analisada é que, por se tratar de um estudo de viabilidade, sua aplicação prática é pouco conhecida, sendo este estudo de pouco valor científico. 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 o quebra mar gerado com o reaproveitamento das estacas contenha o assoreamento e o processo erosivo presentes na Praia do Marahú, beneficiando as populações locais e impulsionando o turismo local.

4 ESTUDO DE CASO: REAPROVEITAMENTO DE ESTACAS DE CONCRETO ARMADO

A importância da engenharia civil não está só nos cálculos de grandes estruturas ou na confecção de um orçamento preciso. Ela também está na sensibilidade de observar o cotidiano e unir o embasamento teórico e o conhecimento prático, para propor soluções diante de um novo problema de engenharia. Assim, inspirado na proposta de Yamamoto e Silva (2016), e sabendo da proporção de resíduos gerados pela construção civil e das problemáticas envolvidas no seu descarte, o presente trabalho apresenta um estudo de caso para o reaproveitamento de sobras de estacas de concreto pré-moldadas como material para a confecção de um muro de contenção.

4.1 EMPREENDIMENTO

As sobras de estacas de concreto pré-moldadas, objeto de estudo deste caso, pertencem a uma obra de médio a grande porte, localizada, como indica a figura 12 (a), no bairro Granja dos Cavaleiros, no município de Macaé – RJ. Conforme o zoneamento urbano de Macaé, descrito pela Lei 141/2010, o empreendimento localiza-se na Zona Industrial 2, apresentada na figura 12 (b). Esta tem entre suas principais características a concentração de empresas de grande porte e a presença de atividades de elevado impacto à vizinhança, majoritariamente residencial. Além disso, a região possui áreas ambientalmente relevantes, sendo a preservação das mesmas um fator determinante para conter sua expansão territorial.

Como indicado nas características da região, as atividades realizadas na área repercutem em construções vizinhas. Deste modo, independente da classificação das edificações próximas (residenciais ou industriais), é necessário tomar todos os cuidados cabíveis para preservar as condições de segurança do entorno. Salienta-se então que parte do terreno do empreendimento faz divisa com outra edificação de médio a grande porte. Acompanhando o perímetro desta divisa, ao longo de 25 m, encontra-se um talude e, por questões de segurança, verifica-se a necessidade do emprego de uma contenção para este declive.



Figura 12 (a) Localização do empreendimento (Google Maps); (b) Zona de loteamento do empreendimento (Mapa de Zoneamento Urbano do Município de Macaé)

O projeto de fundação desta construção incluiu estacas pré-moldadas de concreto, com seções circulares vazadas, conforme verifica-se na figura 13 (a). Estas pelas possuem de três diferentes diâmetros, sendo eles: 42 cm, 50 cm e 60 cm. As estacas de 42 cm possuem 9 cm de espessura, enquanto a espessura das estacas de 50 cm e 60 cm é 10 cm.

Como na cravação de estacas pré-moldadas de concreto, as peças nunca são totalmente cravadas, ou seja, sempre há perdas, como mostra a figura 13 (b), é normal que a quantidade de material comprada exceda a estabelecida em projeto. Esta sobra, necessária à prática construtiva, será então analisada, por meio de um levantamento de dados. Espera-se, através dos quantitativos processados, exprimir a viabilidade de sua proposição como matéria prima para a confecção o muro de contenção necessário ao terreno.

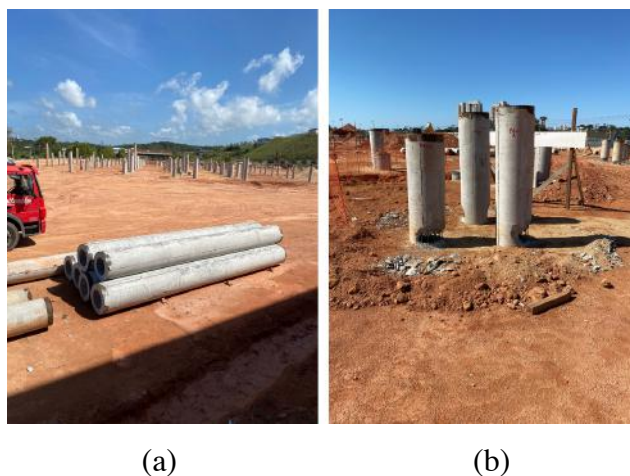


Figura 13 (a) Conjuntura anterior ao arrasamento das estacas; (b) Bloco de estacas (Autora)

4.2 LEVANTAMENTO DE DADOS

O levantamento de dados consistiu na conferência do comprimento das sobras das estacas já cravadas e em fotografá-las. Para sua realização, foram necessárias três visitas *in situ* da autora do trabalho, munida de aparelhos de proteção individual e objetos de medição e registro. Dentre estes objetos destacam-se a trena de 7,5 m, caneta, papel, prancheta e celular com câmera fotográfica. As duas primeiras visitas foram realizadas em diferentes horários do mesmo dia e catalogadas separadamente. A figura 14 registra diferentes agrupamentos mensurados na primeira inspeção. Já a terceira visita foi realizada somente após 9 dias da primeira, por questões externas. Salienta-se ainda que para fins práticos, considerou-se apenas uma casa decimal para as aproximações nas medições.



Figura 14 Grupos medidos na primeira visita; (Autora)

No primeiro dia de medição, a priori, conferiu-se os diâmetros e espessuras das estacas, além das dimensões do talude, onde constatou-se sua proporção 1 x 1. A aferição do comprimento das sobras das estacas, realizada com a trena e registrada em prancheta, iniciou-se pelas peças reunidas nas laterais do terreno e já distantes de seus pontos de cravação, conforme figura 14. Neste momento, foram averiguados 69 itens e fotografou-se os conjuntos avaliados.

Ao retornar ao campo mais tarde do mesmo dia, a referida autora realizou a medição de mais 26 sobras de estacas que se encontravam associadas aos seus respectivos locais de projeto. Analogamente ao procedimento anterior, foram tirados retratos de suas disposições, como pode-se conferir na figura 15.



Figura 15 Estacas dispostas próximas aos seus pontos de projeto; (Autora)

Visto que as sobras eram agrupadas próximas aos pontos de cravação, como verifica-se na figura 16, por questões de logística de canteiro de obras, elas precisaram ser realocadas durante o intervalo entre os dois dias de medição. Assim, a organização encontrada no segundo dia de medição não correspondia à apresentada outrora. Uma vez que a redistribuição ocorreu apenas com as estacas que ainda estavam no centro da obra, obstruindo a circulação, foi possível, através das fotografias feitas identificar os grupos da primeira medição. Desta forma, optou-se por descartar a segunda conferência e, excluindo os grupos identificados na primeira verificação, medir todo o material remanescente novamente, de forma a evitar possíveis erros por exclusão ou duplicação de um conglomerado.



Figura 16 Disposição das estacas pelo canteiro de obras. (Autora)

Temendo a necessidade de retornar à obra um terceiro dia, e encontrar novamente um arranjo diferente das peças, de forma que comprometesse as medições anteriores, mensurou-se inclusive as sobras das estacas que, embora cravadas até a profundidade desejada, ainda não haviam sido arrasadas. Tal medição foi possível uma vez que, após a cravação atingir a profundidade desejada, as estacas eram truncadas, próximas ao solo, sinalizando o local em que seriam posteriormente cortadas, conforme a figura 17.

Como estas marcações não eram regulares em seus formatos graças ao seu processo de execução, a medição foi feita partindo do ponto mais alto, em que a armadura se encontrava exposta na seção da peça, até o topo das estacas, evitando considerações excessivas sobre o comprimento dos pedaços. Esta decisão permitiu que a terceira medição contemplasse todos os insumos necessários.



Figura 17 Detalhamento da marcação para o corte da estaca. (Autora)

Desta forma, foi possível confeccionar a tabela 3 quantificando os pedaços estudados e exprimindo os comprimentos desperdiçados. Contabilizou-se, para as estacas de 42 cm, 40 unidades entre 50 cm e 4,3 m. Foram descritos também 48 elementos de 50 cm, cuja faixa de comprimento compreendia de 50 cm a 4 m. Por sua vez, os 141 fragmentos registrados de 60 cm possuíam entre 60 cm e 5 m. Salienta-se que foi decisão da autora o registro apenas das estacas cujo comprimento fosse igual ou superior à 50 cm.

Diâmetro	Comprimento	Quantidade	Diâmetro	Comprimento	Quantidade
42 cm	0,50 m	3	50 cm	2,70 m	1
42 cm	0,60 m	2	50 cm	2,80 m	3
42 cm	0,70 m	1	50 cm	3,00 m	1
42 cm	0,80 m	1	50 cm	3,10 m	1
42 cm	1,10 m	1	50 cm	3,30 m	1
42 cm	1,20 m	4	50 cm	3,40 m	1
42 cm	1,40 m	1	50 cm	4,00 m	1
42 cm	1,50 m	1	60 cm	0,60 m	5
42 cm	1,60 m	1	60 cm	0,70 m	6
42 cm	1,70 m	2	60 cm	0,80 m	8
42 cm	1,80 m	2	60 cm	0,90 m	8
42 cm	1,90 m	1	60 cm	1,00 m	6
42 cm	2,00 m	6	60 cm	1,10 m	11
42 cm	2,10 m	1	60 cm	1,20 m	6
42 cm	2,20 m	4	60 cm	1,30 m	6
42 cm	2,30 m	3	60 cm	1,40 m	5
42 cm	2,40 m	1	60 cm	1,50 m	7
42 cm	2,60 m	1	60 cm	1,60 m	8
42 cm	3,00 m	2	60 cm	1,70 m	3
42 cm	4,20 m	1	60 cm	1,80 m	14
42 cm	4,30 m	1	60 cm	1,90 m	2
50 cm	0,50 m	1	60 cm	2,00 m	4
50 cm	0,60 m	3	60 cm	2,10 m	3
50 cm	0,70 m	1	60 cm	2,20 m	9
50 cm	0,80 m	1	60 cm	2,30 m	5
50 cm	0,90 m	3	60 cm	2,50 m	1
50 cm	1,00 m	1	60 cm	2,60 m	2
50 cm	1,20 m	4	60 cm	2,70 m	2
50 cm	1,30 m	3	60 cm	2,80 m	6
50 cm	1,40 m	4	60 cm	2,90 m	2
50 cm	1,50 m	5	60 cm	3,00 m	4
50 cm	1,60 m	4	60 cm	3,30 m	1
50 cm	1,70 m	2	60 cm	3,50 m	4
50 cm	1,80 m	2	60 cm	3,70 m	1
50 cm	1,90 m	2	60 cm	4,00 m	1
50 cm	2,20 m	2	60 cm	5,00 m	1
50 cm	2,40 m	1	Total		229

Tabela 3 Levantamento de dados de comprimento e quantidades de estaca por diâmetro. (Autora)

4.3 PROPOSTA DE DESCARTE TRADICIONAL

Com o levantamento de dados realizado foi possível chegar à algumas magnitudes do desperdício destes trechos de estacas. A tabela 4 expressa o volume de concreto de cada peça, calculado a partir das dimensões registradas. Considerando o peso específico do material como 2400 kg/m^3 , obteve-se também o peso de cada estaca estudada. Em suma, tem-se $395,60 \text{ m}$ de estaca desperdiçadas. Quando se trata do volume de concreto, a perda é de aproximadamente $39,39 \text{ m}^3$, que correspondem à 94.544 kg .

Diâmetro	Quantidade	Comprimento total	Volume de concreto	Peso
42 cm	40	72,80 m	$3,29 \text{ m}^3$	7904 kg
50 cm	48	81,20 m	$5,74 \text{ m}^3$	13775 kg
60 cm	141	241,60 m	$30,36 \text{ m}^3$	72865 kg
Total	229	395,60 m	$39,39 \text{ m}^3$	94544 kg

Tabela 4 Resumo do levantamento de dados. (Autora)

Com a inutilização destes trechos de estaca, eles tornam-se resíduos de construção civil e precisam ser corretamente descartados. Convencionalmente, o procedimento padrão seria procurar o aterro sanitário mais próximo, responsável pela disposição de resíduos Classe II B (inertes), como é o caso das peças de concreto. Vale ressaltar que esta classificação abrange apenas materiais com uma baixa capacidade de reação, passíveis ou não de reciclagem e que não tem suas composições alteradas com o passar do tempo. Outro requisito da categoria é a indiferença diante da exposição à água destilada ou deionizada em temperatura ambiente.

Em Macaé, município onde a obra está sendo executada, o destino dos resíduos sólidos é o Aterro Sanitário da Fazenda São Sebastião dos 40, localizado às margens da BR-101, km 149 (sentido Rio de Janeiro – Campos dos Goytacazes). Ele fica a aproximadamente $21,8 \text{ km}$ da futura edificação, como é exibido pelo mapa da figura 18. Como a empresa responsável pela obra é também encarregada do correto descarte dos resíduos, faz-se uma análise dos custos envolvidos nesta atividade.

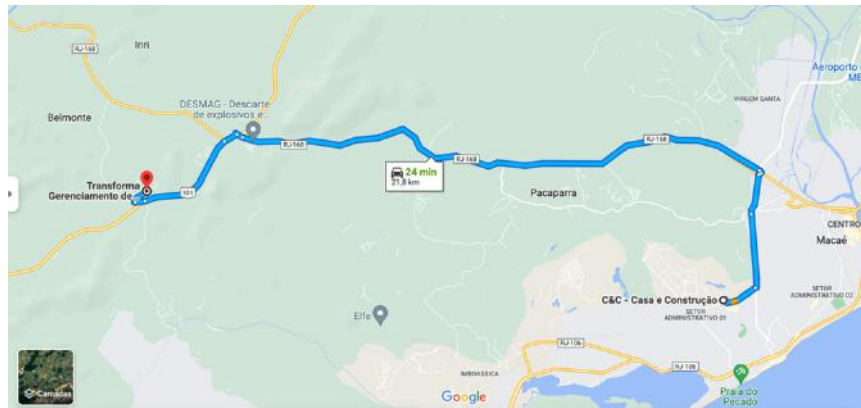


Figura 18 Distância da edificação ao Aterro Sanitário da Fazenda São Sebastião dos 40 (Google Maps, 2022)

Deve-se lembrar que as estacas são peças vazadas e, por isso, a análise de seu transporte deve levar em conta o volume aparente de cada item. Em termos de volume aparente, tem-se quase 2,4 vezes o volume de concreto encontrado, totalizando $94,34 \text{ m}^3$. Considerando o volume aparente, bem como o peso das estacas a serem transportadas, contactou-se empresas da região especializadas no transporte de cargas, chegando ao modelo ideal de caminhão para este carregamento e estimando seu custo.

Por se tratar de peças pesadas, seria necessário o emprego de um Caminhão Munck, pois guindaste articulado possibilita a movimentação das sobras de estacas para aloca-las no veículo de transporte. O modelo sugerido pelas empresas de locação foi o Volkswagen Worker 17 180, de acordo com o retratado na figura 19. Este tipo de automóvel suporta até 16 toneladas e sua carroceria possui aproximadamente 7 m de comprimento e 2,5 m de largura, totalizando $17,7 \text{ m}^2$ de área.



Figura 19 Caminhão Volkswagen Worker 17 180 (MF RURAL, 2022)

O número de viagens necessárias é calculado de forma a atender as limitações quanto ao peso e quanto às dimensões do veículo, sendo o último fator determinante neste caso. Considerando as aproximadamente 95 toneladas de concreto, 6 viagens deveriam ser premeditadas. Todavia, como tem-se 229 estacas, esta quantificação impõe a transferência de uma média de 39 peças por vez. As peças podem ser amontoadas para o deslocamento, desde que haja cintas com catraca para amarração, e elas sejam associadas, ao longo da largura da carroceria, em formato de pirâmide, evitando o deslizamento.

Nesta etapa, deve-se ficar atento à ordenação dos itens na carroceria. Isto porque, a disposição das peças influencia diretamente na localização do centro de massa do conjunto, ponto em que se admite a concentração da massa do sistema e a aplicação das forças externas. Como para corpos sujeitos a campos gravitacionais homogêneos, o centro de massa coincide com o centro de gravidade, a organização ideal torna-se ainda mais importante. Determinar o centro de gravidade de uma carga e estimar os esforços necessários para movimentá-la, permite assegurá-las quanto ao risco de tombamento. Salienta-se então que os conjuntos devem ser empilhados de forma a manter as estacas de maiores diâmetros na base. Nesta configuração, o centro de massa do agrupamento seria deslocado para baixo, dificultando a movimentação do conjunto.

Para esta análise de viabilidade do número de viagens de acordo com o peso máximo suportado, foram feitas algumas considerações. Tomou-se a moda do diâmetro das estacas estudadas, chegando ao valor de 60 cm. Em seguida calculou-se a média de comprimento dos itens registrados, sendo esta 1,73 m. Para fins práticos, aproximou-se as estacas de um paralelepípedo, cuja base tem 0,6 m de largura por 1,73 m de comprimento, correspondendo à aproximadamente 1m² de área. Dividindo-se a largura da carroceria (2,5 m) pela largura das estacas (0,6 m), encontra-se o valor de 4,16. Logo, sabe-se que o número máximo de estacas a serem distribuídas transversalmente é 4. Analogamente para o comprimento, divide-se 7 m por 1,73 m e obtém-se o valor 4,04, limitando o número de estacas alocadas longitudinalmente também à 4. Desta forma, tem-se 16 estacas na base da carroceria.

Como não é recomendado que a altura da pirâmide exceda a altura da cabine do caminhão, limita-se a sobreposição à 3 fileiras. Assim, verificando a seção transversal, a fileira intermediária seria composta por 3 estacas e o topo por duas, formando a pirâmide com um total de 9 estacas, conforme a figura 20. Visto que longitudinalmente também podem ser dispostas 4 estacas, obtém-se 4 séries piramidais de 9 peças, totalizando 36 itens por viagens, número inferior ao estipulado de acordo com a carga máxima admitida (39 sobras).

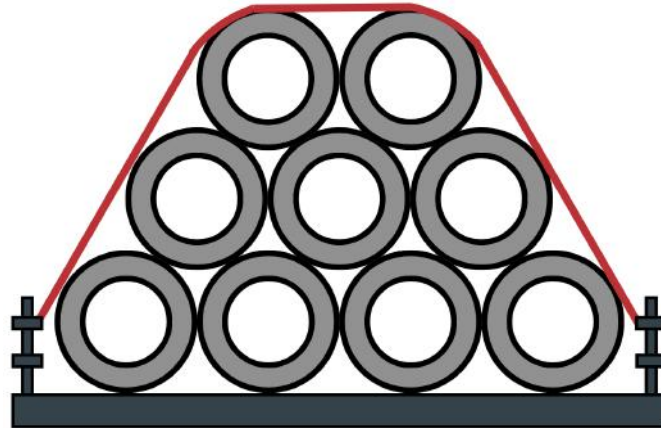


Figura 20 Seção transversal da disposição das estacas na carroceria. (Autora)

Desta forma, seriam necessárias no mínimo 7 viagens para transferir os resíduos da obra até o aterro de descarte. Estima-se que cada viagem dure aproximadamente uma hora e meia, considerando o percurso de ida e volta, compreendendo estes 24 minutos cada, além do tempo para carregamento e descarregamento do material. Desta forma, seriam demandadas dez horas e meia e seriam percorridos 305,2 km. O dispêndio de tempo e distância para o traslado não são os únicos gastos em análise. É preciso levar em conta também o valor do aluguel do equipamento. As empresas locais, que aceitaram participar da pesquisa, alugam seus veículos por diária, sendo a média de seus valores igual a R\$ 3.600,00. Embora em obras de grande porte tal valor não seja representativo frente ao orçamento geral, considera-se toda economia válida.

4.4 PROPOSTA DE REAPROVEITAMENTO DAS ESTACAS

Influenciada pelo trabalho de Yamamoto e Silva (2016), a proposta de reaproveitamento das estacas pré-moldadas de concreto respalda-se na qualidade e na quantidade de material remanescente à cravação. Reitera-se que a análise do problema foi feita a nível regional, conforme é recomendado quando se deseja um projeto sustentável. Além de atender à uma necessidade local, busca-se também atingir o equilíbrio do tripé sustentável. Os benefícios desta aplicação são então categorizados de acordo com sua área de impacto.

4.4.1 Local estudado

É essencial conhecer as propriedades e o comportamento do solo em que se deseja construir. O estudo do solo permite a definição desde o tipo ideal de fundação, até drenagem necessária durante à execução da obra e ao bom funcionamento da edificação. Sendo assim, salienta-se que o solo da região em análise possui características de formação Barreira. Arai (2006) afirma tal formação percorre o litoral do país começando pelo Rio de Janeiro e chegando ao Amapá. Sob influência marinha, destaca-se também o encontro de sedimentos da formação Barreiras provenientes das rochas sedimentares terciárias, formadas na história da abertura do Atlântico. Sua apresentação é definida por planaltos, ligeiramente inclinados em direção à costa, e seus sedimentos podem ser pouco ou não consolidados, areias finas a grossas, com predominância de grãos angulosos e argilas cinza-avermelhadas (VILAS BOAS; SAMPAIO; PEREIRA, 2001).

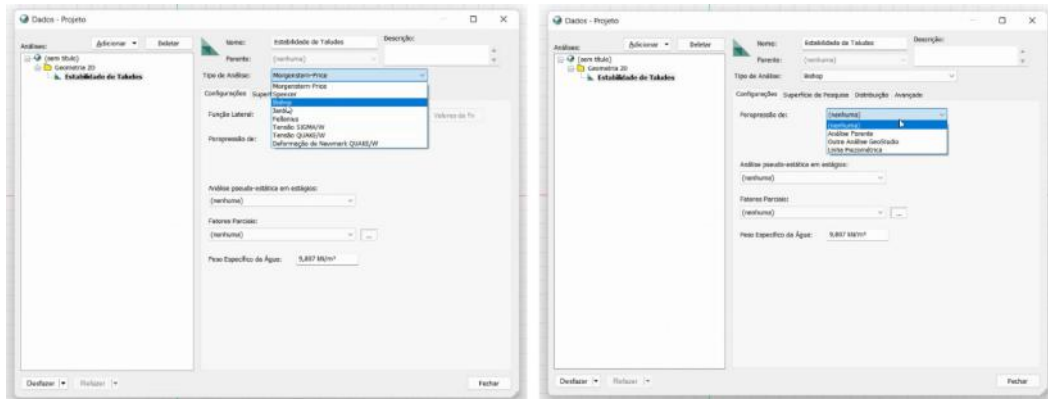
Dadas as características gerais do solo em estudo e feitas as considerações necessárias sobre as edificações da redondeza, verificou-se, com o auxílio do Software Geoslope, as condições de estabilidade do talude presente no terreno. A Figura 21 apresenta uma visualização do topo do talude (crista) e da base do talude (pé). Este talude possui 1,4 m de altura, 1,4 m de largura e 25 m de comprimento.



Figura 21 Talude presente no terreno (Autora)

Para o tipo de análise através do software, foi necessário definir parâmetros de projeto. Sendo assim, utilizou-se o critério de Ruptura segundo Bishop, conforme a figura 22 (a), que examina o equilíbrio de momentos e forças verticais, fornecendo resultados próximos aos

métodos mais rigorosos, mesmo desconsiderando as interações horizontais. Além disso, optou-se por desprezar a poropressão, como é exibido na figura 22 (b), já que o nível d'água do terreno apresentava-se muito baixo.



(a)

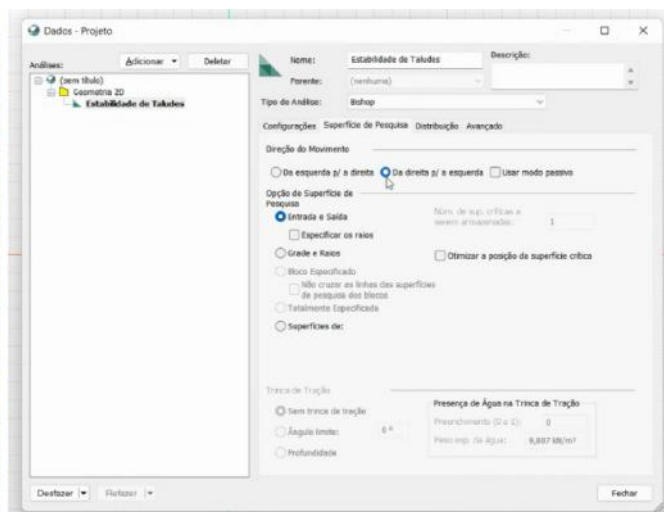
(b)

Figura 22 (a) Definição do tipo de análise; (b) Definição da poropressão (Autora)

Outra consideração feita foi quanto à superfície de pesquisa. Seguiu-se o ângulo das fotografias tiradas em campo, de acordo com a figura 23 (a), para a tomada de decisão. Assim, adotou-se a direção do movimento da direita para a esquerda, como pode-se conferir na figura 23 (b).



(a)



(b)

Figura 23 (a) Fotografia do talude; (b) Definição da direção do movimento (Autora)

De posse das especificações devidamente estabelecidas, foi gerada uma grid, com os eixos x e y definidos para a confecção do desenho do talude objeto de estudo. A delimitação dos limites dos eixos, basearam-se em conceitos prévios de geotecnia. É válido salientar que para o cálculo da sobrecarga da edificação vizinha, foi pressuposto uma carga padrão de galpão e estacionamento de 10 kN/m^2 . Assim, desenhou-se o talude em corte, aplicou-se a carga estimada e definiu-se as entradas e saídas da superfície de pesquisa. A figura 24 indica o resultado desta análise. O fator de segurança obtido (0,966) é inferior à 1,5, exigido pela NBR 11682/1991: Estabilidade de taludes. Comprova-se então a necessidade de uma contenção para o talude apresentado

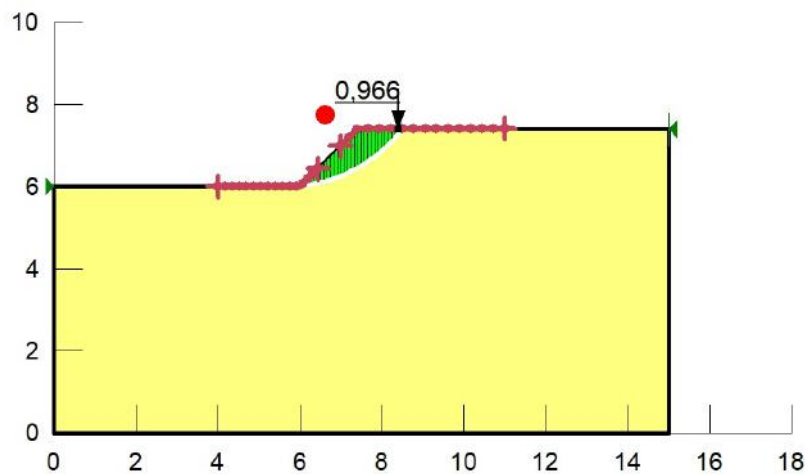


Figura 24 Fator de segurança do talude (Autora)

4.4.2 Utilização das estacas pré-moldadas como contenção

Para a utilização das sobras de estacas como contenção, propõe-se primeiramente a realização de um corte de 90° no talude. Tal movimentação permitirá o emprego das estacas justapostas formando uma espécie de arquibancada. Sugere-se também a implementação de vegetação no topo do talude, sendo esta justificada pelos benefícios que advém de sua utilização.

A proteção superficial é importante na estabilização de taludes de corte ou de aterro e encostas naturais, impedindo a erosão e a infiltração de água. Para este fim, o revestimento vegetal, representado pelas gramíneas, apresenta-se como a melhor proteção porque suas folhas absorvem a maior parte do impacto das gotas de chuva e suas raízes fixam o solo superficial, impedindo que ele seja carregado pela água. (PASSARINHO, 2014, p.4)

Estando o terreno preparado para receber a contenção, é necessário tomar alguns cuidados com as estacas. Isto porque, é importante lembrar que elas já estiveram diante de solicitações ao serem envolvidas em processos de cravação. Assim, seguindo a intervenção proposta para o trabalho de Yamamoto e Silva (2016), uma seleção seria realizada a fim de, com o auxílio de um fissurômetro (figura 25), identificar as estacas cuja cravação propiciou trincas que comprometessem a segurança da peça.

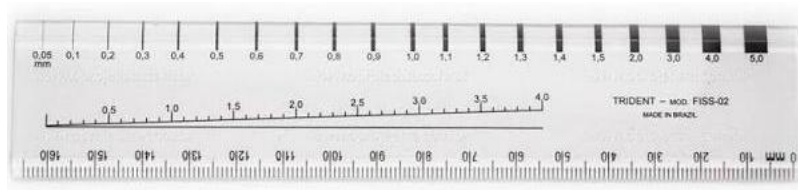


Figura 25 Fissurômetro (TRIDENT, 2022)

Além desta seleção, como as peças originalmente foram cortadas sem cautela, conforme é detalhado na figura 26 (a), pois seriam descartadas, faz-se necessário um tratamento das estacas para o seu novo emprego. Por questões estéticas e de segurança, haja visto que a arribancada não cumpriria apenas a função inicial de contenção, mas também seria um ambiente de lazer para o descanso de funcionários e clientes do estabelecimento, é fundamental um arremate das seções em que houve a cisão, como é indicado pela figura 26 (b). Deste modo, elimina-se as imperfeições como desníveis e a armadura exposta.



Figura 26 (a) Detalhamento do corte das estacas; (b) Sugestão de acabamento necessário. (Autora)

Após a triagem, a contenção seria então formada pela sobreposição das estacas, que se manteriam estáticas por ação da gravidade (figura 27). A primeira fileira seria composta por três peças, a segunda por duas e haveria uma peça no topo. Dada esta configuração, é necessário que os 25 m de comprimento do talude sejam percorridos seis vezes. Estimando uma perda de

até 30% do comprimento total, em função do processo de apuração e harmonização imposto, confeccionou-se a tabela 5, visando verificar em termos quantitativos a viabilidade da proposta.

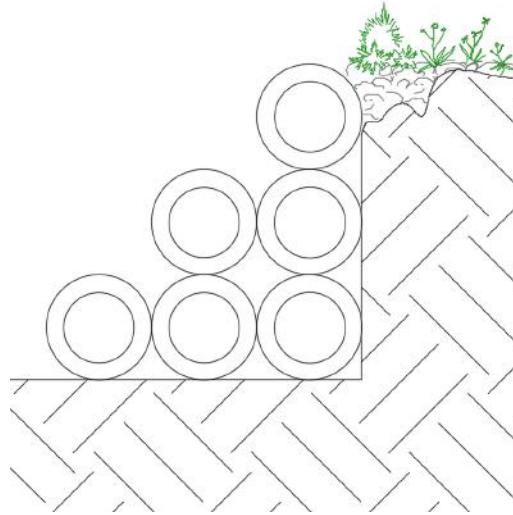


Figura 27 Proposta de disposição das estacas (Autora)

Diâmetro	Comprimento original	Novo comprimento	Número de vezes que é possível percorrer o perímetro
42 cm	72,80 m	50,96 m	2
50 cm	81,20 m	56,84 m	2
60 cm	241,60 m	169,12 m	6
Totais:	395,60 m	276,92 m	10

Tabela 5 Dados para o reaproveitamento de estacas (Autora)

Os valores expressos na tabela 5 comprovam a viabilidade da proposição sugerida. As estacas de 60 cm seriam suficientes para construir a contenção a partir do seu reaproveitamento. Por questões estéticas, sugere-se que toda a contenção seja feita com estacas do mesmo diâmetro, apresentando harmonia e linearidade, conforme esquematização feita com auxílio do software AutoCad e exposta na figura 28. Assim, seriam utilizadas três fileiras de estacas de 60 cm, com 3 estacas na base, 2 na camada intermediária e uma no topo, totalizando 6 estacas por seção da contenção. Salienta-se, no entanto que, caso as perdas, durante a seleção e tratamento dos itens, fossem superiores às estimadas, o projeto ainda seria viável pelo remanescente das estacas dos demais diâmetros, que foram descartadas neste caso.

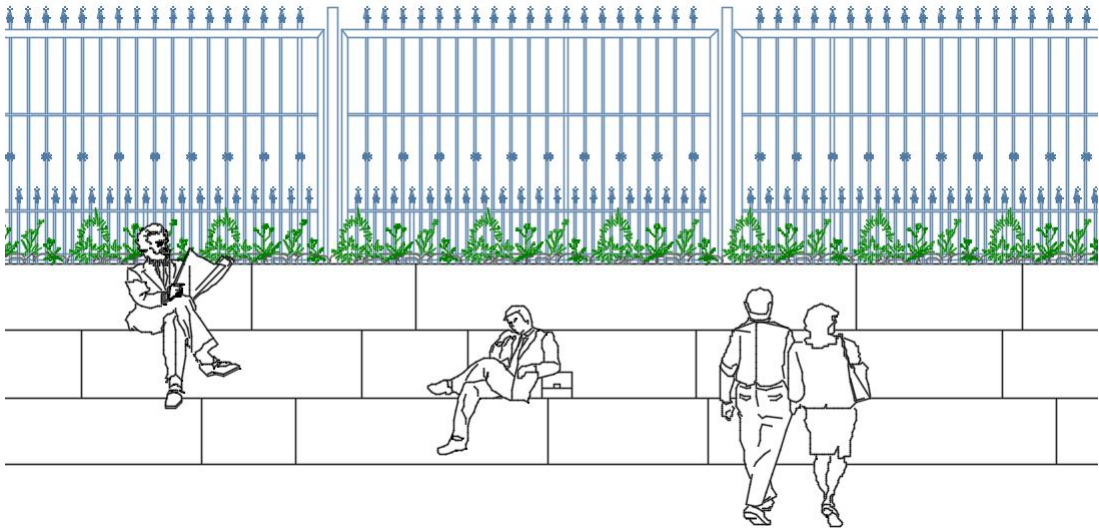


Figura 28 Proposta de reutilização das peças como contenção formando uma arquibancada (Autora)

Concebido o projeto para a contenção, faz-se necessário verificar sua viabilidade quanto às questões de segurança. Utilizando mais uma vez o Software Geoslope, analisou-se o talude diante do cenário proposto pela contenção a partir do reaproveitamento das estacas. A figura 29 mostra o novo desenho feito, já considerando o corte do talude a 90° . É importante destacar que por limitações do Software, não foi possível ilustrar as estacas sobrepostas nesta investigação. Porém utilizou-se o mesmo material e aproximou-se as dimensões, de forma a preservar a carga imposta pela contenção.

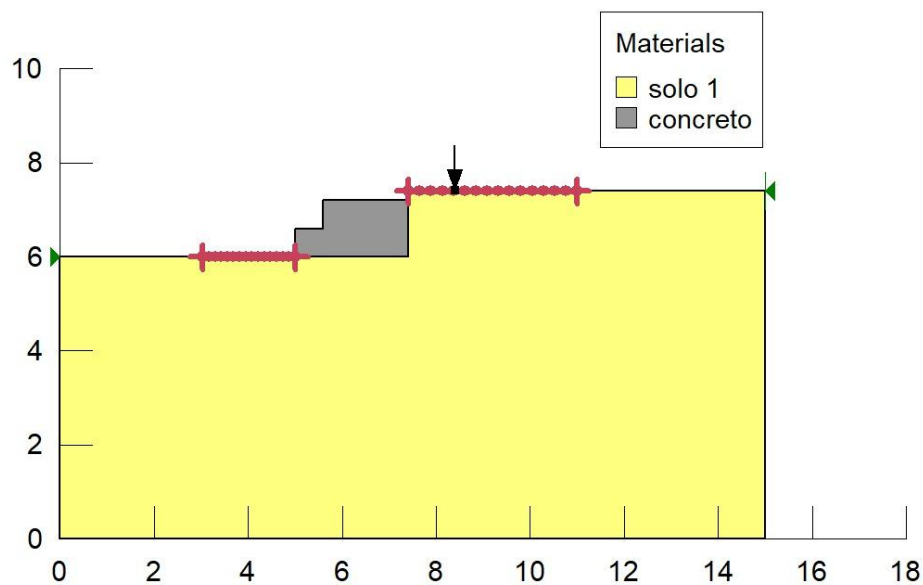


Figura 29 Análise da solução proposta (Autora)

Ao executar a verificação da proposta de solução, encontra-se um novo valor para o fator de segurança, sendo este 1,895 (figura 30). Como o número é maior que o mínimo exigido por norma (1,5), pode-se concluir a exequibilidade de tal projeto, uma vez que ele atende aos requisitos de segurança obrigatórios.

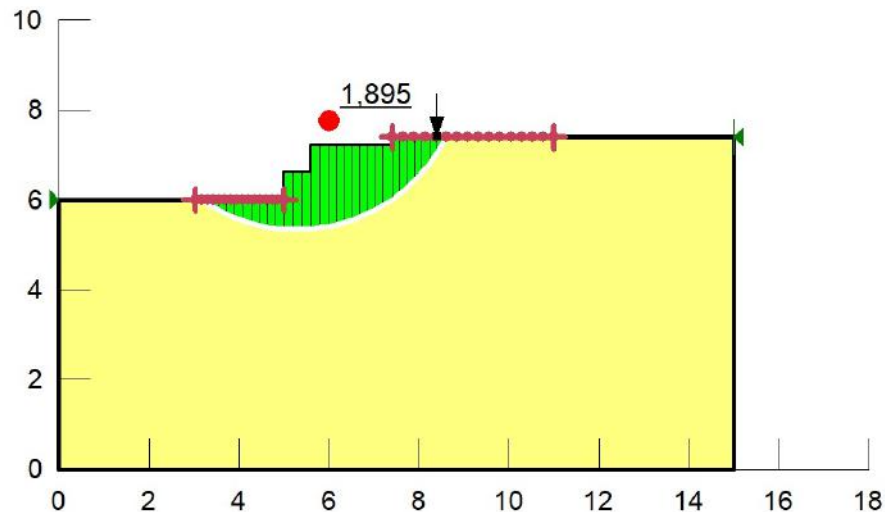


Figura 30 Fator de segurança com a solução proposta (Autora)

Uma preocupação durante o estudo foi quanto a resistência das estacas da base servindo de apoio à estaca do topo. As peças são projetadas apenas para sustentar o peso próprio e o maior momento a que estão submetidas é quando são içadas para a cravação. Este receio foi descartado pela própria disposição das estacas na obra. Durante os períodos de espera, elas eram empilhadas sem nenhum prejuízo, como pode-se aferir na figura 31.



Figura 31 Diferentes grupos empilhados com estacas sobrepostas. (Autora)

4.5 PROPOSTA DE CONTENÇÃO HABITUAL

Uma das opções para obras de contenção são as estacas raiz secante. A proposta consiste na execução, no terreno natural, de múltiplas estacas raiz, secantes entre si, que passam a

compor uma espécie de parede de contenção, de acordo com a figura 32. Garante-se então a estabilidade do solo e permite-se também a realização de escavações.

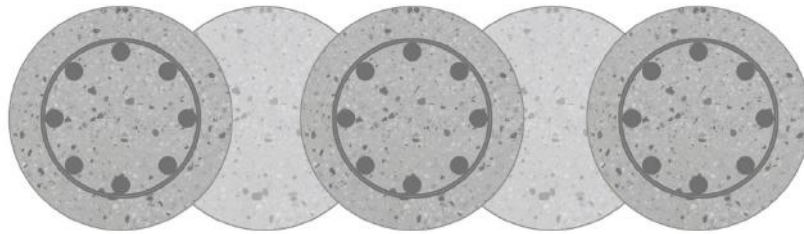


Figura 32 Esquema de Estacas Secantes (Sandeep, 2020)

Como as dimensões e a distribuição das estacas variam conforme as cargas solicitantes e sua finalidade, a utilização de estacas raiz secante como contenção carece de algumas considerações. A primeira delas é que em casos de taludes inferiores a 6 m, a estaca deve ser projetada de tal forma que a profundidade alcançada seja igual a altura exposta acima do solo, como pode-se conferir na figura 33.



Figura 33 Exemplo da utilização de estacas raiz secantes como contenção (BAUER, 2022)

Dadas as dimensões do talude a ser contido (1,4 m x 1,4 x 25 m), admite-se o emprego de estacas de 30 cm de diâmetro, já que por questões executivas um diâmetro inferior seria inviável e por questões econômicas um diâmetro superior seria descabido. Deste modo, estima-se a necessidade de 167 estacas de 30 cm, com comprimento aproximado de 3 m, totalizando um volume de 35,5 m³ de concreto.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Retoma-se brevemente os casos revisados bibliograficamente a fim de reforçar seus benefícios, dado a importância de manter o assunto em evidência pelo seu potencial de influenciar novos casos. As principais vantagens de cada método são então exibidas de acordo com a ordem dos trabalhos apresentados. Assim, destacar os seguintes aspectos relevantes das estacas geotérmicas:

- a) Eixo ambiental: 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 CO₂, nos países cuja matriz energética baseia-se nos derivados do petróleo.
- b) Eixo social: O sistema permite a climatização contínua da edificação, sendo importante uma vez que o conforto térmico proporciona o bem-estar físico e mental para executar ações intelectuais ou manuais.
- c) Eixo Financeiro: o sistema possui 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. Além disso, este tipo de energia, diferente da hidrelétrica, não fica à mercê de variáveis, como o regime de chuvas e os tempos de seca.

Analogamente, pontua-se, de forma prática, os ganhos no que tange à sustentabilidade quando analisado o “Estudo do uso de garrafas PET em geotecnia” (SANTOS, 2005).

- a) Eixo ambiental: Há a reciclagem da garrafa PET, material de grande preocupação dos ambientalistas dado sua longa vida útil.
- b) Eixo social: A estaca PET pode ser confeccionada facilmente, não necessitando de mão de obra especializada. Esse fato permite um maior acesso à população, que pode utilizá-la em mutirões para construções menos abastadas.

c) Eixo Financeiro: A matéria prima para a confecção das estacas é reciclada e, portanto, seu custo de aquisição é nulo.

Por último, tem-se os comentários a cerca dos prós provenientes do “Reaproveitamento de estacas pré-moldadas, como possíveis soluções nas construções de barreiras contra o assoreamento” (YAMAMOTO; SILVA, 2016), que foi fonte de entusiasmo para o estudo de caso desenvolvido no presente trabalho.

a) Eixo ambiental: Reaproveita-se materiais que seriam descartados, muitas vezes incorretamente; evita-se a extração de matérias primas e os gastos energéticos para transformá-las em novos itens e reduz-se a liberação de CO₂, uma vez que não é necessário o transporte.

b) Eixo social: Ao conter a erosão local que, acarreta dificuldades para transitar na região, melhora-se a qualidade de vida da população e pode-se explorar o turismo, gerando empregos para a sociedade.

c) Eixo Financeiro: Economiza-se por dispensar a compra de novos materiais, o transporte e os impostos.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, reflete-se a cerca dos resultados, do estudo de caso objeto do presente trabalho, para os setores econômico, social e ambiental. Lembra-se que as vantagens serão contempladas tanto pela economia com o descarte do material quanto pela solução à contenção. Neste contexto é importante ainda destacar que de acordo com os dados registrados no 2º Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, ao estudar os anos entre 1990 e 2005, o Brasil emite cerca de 536 kg de CO₂ por tonelada produzida de cimento, matéria prima das peças pré-moldadas em análise.

Sabendo que para a produção de 1 m³ de concreto são utilizados aproximadamente 6 sacos de cimento de 42 kg (Reinhart, 2021), tem-se um consumo de 252 kg de cimento por metro cúbico concreto. Como na confecção da contenção a partir de estacas raiz, justapostas de maneira secante, seriam utilizados 35,5 m³ de concreto, haveria um dispêndio de 8946 kg cimento para esta mistura. Tal valor corresponde à aproximadamente 9 toneladas do material. Empregando a relação exposta quanto à quantidade de CO₂ emitido por tonelada de cimento

produzida, infere-se que 4824 kg de CO₂ seriam lançados à atmosfera para produzir a quantidade de cimento necessária à produção do volume de concreto para as estacas raiz secantes.

Por outro lado, ao optar pela reutilização das sobras de estacas da própria obra, evita-se todo este processo, não havendo novas emissões de carbono. A construção torna-se, portanto, mais próxima de uma consciência sustentável desejável. Tal alinhamento não se dá apenas por esta solução conter as emissões do poluente, mas por ela atender aos três pilares do tripé da sustentabilidade e cooperar, mesmo de forma breve, ao alcance de objetivos maiores, como os ODS.

Ambientalmente falando, há diversas vantagens envolvidas neste método. Primeiramente, cita-se o reaproveitamento de um material que seria descartado em aterros, ou seja, promove-se a redução na geração de resíduos. Ao evitar este descarte, evita-se também a liberação de mais CO₂ na atmosfera, ao passo que as múltiplas viagens de realocação das peças para o correto descarte não são mais necessárias. Ademais, o emprego de peças recicladas contém a exploração de jazidas naturais para a obtenção de matéria prima, que seria utilizada na confecção de novos produtos. Reitera-se então a economia na emissão de 4824 kg de CO₂ para a confecção do cimento necessário à solução de contenção convencional.

Já o aspecto econômico pode ser encarado a partir de duas óticas. A priori, lembra-se que o material a ser reutilizado já foi pago, ou seja, possui custo nulo de aquisição. Por outro lado, a inutilização dele impõe gastos tanto para transportá-lo ao aterro de destino, quanto para adquirir novos materiais que atendam à construção de uma contenção para o talude, já que a necessidade não é extinta.

Por fim, a esfera social é abordada na criação de uma área de convívio ao ar livre, que passará a atender funcionários em seus horários vagos e clientes do estabelecimento. Espaços públicos são extremamente importantes para o relacionamento humano, pois permitem encontros e trocas entre diversos grupos. Além disso, estas zonas proporcionam bem-estar ao passo que o indivíduo consegue relaxar, por se tratar de um ambiente descontraído. São propícias ao local atividades como conversar, comer ou descansar.

Esta concepção de reaproveitamento sustentável, embora pensada de maneira local, priorizando a cultura da sociedade em que está inserida, não deixa de contribuir para questões globais. A solução de pequenos desafios do cotidiano de forma econômica, social e ambientalmente consciente é o primeiro passo para alcançar o modelo de progresso ideal. Isso porque, propósitos tangíveis incentivam a população e mostram como é possível crescer sem

agredir o meio ambiente, com responsabilidade sobre o coletivo e de maneira financeiramente válida.

A prática desta ideologia de desenvolvimento é justamente o que previa a AGNU quando estipulou os 17 ODS a serem conquistados até 2030. Ao atender o tripe da sustentabilidade, a solução sugerida também contribui para o Brasil alcançar três objetivos do desenvolvimento sustentável. Inicia-se a colaboração com o 9º ODS: Indústria, Inovação e Infraestrutura, uma vez que este tem entre suas especificidades a construção de infraestruturas resilientes e o fomento da inovação, em concordância com o estudo de caso apresentado.

Os dois próximos suportes ao desenvolvimento sustentável ocorrem no 11º e no 12º objetivo. O primeiro disserta a cerca de cidades e comunidades sustentáveis. Segundo este, as cidades e assentamentos devem ser inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. Já o segundo, refere-se ao consumo e produção responsáveis em que, com apoio das instituições públicas e privadas, deverão ser assegurados padrões de produção e de consumo que sejam sustentáveis e conscientes. A criação desta área no empreendimento, a partir do material que seria descartado da própria obra, satisfaz simultaneamente as incitações referidas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando que é objetivo do presente trabalho a proposição de soluções sustentáveis no âmbito da engenharia de fundações e das obras de geotecnia, analisam-se os resultados e expectativas dos temas expostos. Tendo em conta o conceito de sustentabilidade, balanceiam-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. Discute-se então os casos, de acordo com a ordem que foram retratados.

6.1 APLICAÇÕES PRÉVIAS

A priori, 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 vieses econômicos, sociais e ambientais, as estacas trocadoras de calor apresentam-se como uma solução para atenuar o consumo energético derivado da necessidade de sistemas resfriadores.

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 aos 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 elas. É necessário entender o comportamento deste tipo de estaca, bem como o do solo em que ela estará inserida. Um maior embasamento teórico do funcionamento de tal conjunto, e das características locais, permitirá projetar com a devida segurança este sistema, que cumpre também função estrutural.

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 aos setores socioeconômicos. Todavia, embora possa ser considerada uma fundação profunda sustentável, quando se discute sua execução prática, as estacas PET ainda carecem de estudos e apresentam limitações, principalmente no que se refere à baixa capacidade de carga e ao potencial de deformabilidade, característico do material. A união destes fatores a tornam, atualmente, restritas a casos especiais.

Finalmente, 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.

6.2 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso proposto sobre o reaproveitamento de estacas de concreto pré-moldadas como muro de contenção cumprindo, simultaneamente, a função de arquibancada também pode ser considerado sustentável. Isso porque, com base em seus benefícios expostos,

a proposta respeita os interesses sociais, econômicos e ambientais. Além de com isso, satisfazer o tripé da sustentável, a proposta leva em conta o aspecto local da sustentabilidade e contribui para que o Brasil seja um dos países a atingir, até 2030, alguns dos objetivos globais criados pela AGNU.

6.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Conclui-se então o sucesso das propostas no que concerne às preocupações sustentáveis. Reitera-se que elas sempre podem ser aperfeiçoadas a fim de ampliar e difundir seu campo de utilização. Assim, sugerem-se as seguintes propostas para futuras pesquisas:

- Análise da tecnologia das estacas geotérmicas para o clima brasileiro;
- Estudo de métodos para aumentar a capacidade de carga das estacas PET;
- Aplicação do estudo de viabilidade do caso das estacas pré-moldadas para a praia do Marahú;
- Dimensionamento estrutural e geotécnico do muro de contenção a partir de estacas pré-moldadas, viável segundo a análise apresentada;
- Ainda sobre o presente estudo de caso, dado que a quantidade de sobras de estacas superou a necessidade para a confecção da contenção, incita-se a exploração de novas formas de utilizá-las.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, U. (2010) **Reciclagem de lama bentonítica**. Fundações e Obras Geotécnicas. Ed. Ruder. v. 1, São Paulo. 58-60 p.

ANDERSON, N. L. M. et al (2012) **Será que o termo sustentabilidade não surgiu para manter no espaço de tempo, a ideia de desenvolvimento hegemônico?** Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/sifedocregional/images/Anais/Eixo%2003/Norberto%20Luiz%20Marques%20Andersson.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682** Estabilidade de taludes. Rio de Janeiro, 1991. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122** Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 1996. 2 p.

BRANDL, H. (2013) **Thermo-Active Ground-Source Structures for Heating and Cooling**. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013. 9-18 p.

BRITOS ENGENHARIA (2018). **A História da Engenharia Civil no Brasil e no Mundo**. Disponível em: <<http://britosenharia.com.br/todosartigos/a-historia-da-engenharia-civil-no-brasil-e-no-mundo/>> Acessado em: 25/07/2022

CAMPOS, T. (2014) **Definição e origem da engenharia**. Disponível em: <<https://istoeengenharia.wordpress.com/2014/08/28/definicao-e-origem-da-engenharia/>> Acesso em: 25/07/2022

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.

FARIA, V. (2019) **Brasil pode reciclar 98% dos resíduos da construção civil, mas só consegue dar conta de 21%.** Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/haus/sustentabilidade/brasil-pode-reciclar-98-dos-residuos-da-construcao-civil-mas-so-consegue-dar-conta-de-21/>>. Acesso em: 23 out. 2021.

FURUKAWA, F. M, CARVALHO, B. B. (2005) **Técnicas construtivas e procedimentos sustentáveis – estudo de caso: edifício na cidade de São Paulo.** Trabalho de Graduação, Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. 62 p.

MARÇON. A. (2021) **Em 2020, o PET mostrou sua força e flexibilidade - ABIPET.** Disponível em: <<https://www.plastico.com.br/em-2020-o-pet-mostrou-sua-forca-e-flexibilidade-abipet/2/>>. Acesso em: 30 out. 2021.

MELO, P. M. G. et al (2018). **Análise e proposta de destinação de resíduos de petróleo, borra oleosa e seu impacto no meio ambiente.** Educação Ambiental em Ação. Disponível em: <<https://revistaea.org/artigo.php?idartigo=1439>>. Acesso em: 23 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>.

MOTA, C. B. N. (2010) **Estudo comparativo do impacto ambiental produzido pelo uso de lama bentonítica e de polímero em obras de fundações na construção civil.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Departamento de Tecnologia Ambiental, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo / IPT. 14, 26, 61 p.

OLIVEIRA, M. R., BONETTO, N.C.F. (2018) **Reutilização de resíduos da construção civil.** Revista Acadêmica Oswaldo Cruz. Disponível em: <https://oswaldocruz.br/revista_academica/content/pdf/Edicao_22_MIGUEL_RAMOS_DE_OLIVEIRA.pdf>. Acesso em: 23 out. 2021.

PASSARINHO, C. E. F (2014). **PROTEÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES E ÁREAS MARGINAIS COM COBERTURA VEGETAL: estudo de caso no Município de**

Belém-PA. Trabalho de conclusão de curso, Graduação em Especialista lato sensu em gestão hídrica e Ambiental, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. 4 p.

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. 101-159 p

SOUZA, D. (2022) **Crise energética nunca mais! Finlândia desenvolve bateria de areia capaz de armazenar energia por meses sem usar lítio: “Solução mais barata e sustentável”.** Disponível em: <<https://clickpetroleogas.com.br/crise-energetica-nunca-mais-finlandia-desenvolve-bateria-de-areia-capaz-de-armazenar-energia-por-meses-sem-usar-litio-solucao-mais-barata-e-sustentavel/>> Acesso em: 12/07/2022

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>. 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.

UN ENVIRONMENT PROGRAMME (2020). **Emissões do setor de construção civil atingiram recordes em 2019 – relatório da ONU.** Disponível em: <<https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/emissoes-do-setor-de-construcao-civil-atingiram>> Acessa em: 07/07/2022.

WERNER, G. F., (2019) **Impactos da geração de resíduos de construção civil. SINDUSCON - Balneário Camburiú e Camboriú.** Disponível em: <<https://www.sindusconbc.com.br/impactos-da-geracao-de-residuos-de-construcao-civil/>>. Acesso em: 23 out. 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/viiimostradevry/30012-REAPROVEITAMENTO-DE-ESTACAS-PRE-MOLDADAS-COMO-POSSIVEIS->

SOLUCOES-NAS-CONSTRUCOES-DE-BARREIRAS-CONTRA-O-ASSOREAMEN>.

Acesso em: 20 set. 2021.

BAUER ANGOLA (2022). **Cortinas de estacas secantes**. Disponível em: https://www.bauer-angola.com/en/construction_methods/secant_pile_walls/. Acesso em: 27 jul. 2022

REINHART, K. A. (2021). **Quanto de cimento vai em um metro cúbico de concreto?**. Disponível em: <https://www.ehow.com.br/cimento-vai-metro-cubico-concreto-info_369579/> Acesso em: 27 jul. 2022

SANDEEP, K. (2020) **Shoring system for deep excavation**. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/shoring-system-deep-excavation-sandeep-k/>> Acesso em: 15 jul. 2022

GIOVANELLI, A. (2015). **Triple bottom line ou tripe da sustentabilidade**. Disponível em: <<https://logisticareversa.org/triple-bottom-line-ou-tripe-da-sustentabilidade/>> . Acesso em: 08 jun. 2022

RODGERS, L. (2018). **Aquecimento global: a gigantesca fonte de CO2 que está por toda parte, mas você talvez não saiba**. Disponível em: < https://www.bbc.com/portuguese/geral-46591753?ocid=socialflow_facebook&fbclid=IwAR2IJnB6LgBs90rApflW-YUujEMMQxPFxb7fSs0rLOAf4IsXVUYW9cfjDO4> Acesso em: 06 jun. 2022