

BEATRIZ MAFFINI GOMES

**Avaliação simplificada do ciclo de vida de estacas geotérmicas
de baixo carbono**

SÃO PAULO

2023

BEATRIZ MAFFINI GOMES

**Avaliação simplificada do ciclo de vida de estacas geotérmicas
de baixo carbono**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Área de concentração: Engenharia de
construção civil e urbana

Orientador: Prof. Dr. Vanderley M. John

SÃO PAULO

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 10 de novembro de 2023

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Gomes, Beatriz Maffini

Avaliação simplificada do ciclo de vida de estacas geotérmicas de baixo carbono / B. M. Gomes -- versão corr. -- São Paulo, 2023.

67 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Concreto 2.Geotermia 3.Fundações 4.Avaliação do ciclo de vida
5.Construção Sustentável I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Nome: GOMES, Beatriz Maffini

Título: Avaliação simplificada do ciclo de vida de estacas geotérmicas de baixo carbono

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 10/11/2023

Banca Examinadora

Prof. Dr.: Vanderley M. John

Instituição: Universidade de São Paulo

Julgamento: APROVADA

Prof. Dra.: Cristina Cavalcanti Tsuha

Instituição: Universidade de São Paulo

Julgamento: APROVADA

Prof. Dra.: Inês Osório

Instituição: Universidade de Aveiro

Julgamento: APROVADA

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Vanderley John pela orientação, pelos conhecimentos compartilhados, pelas provocações e por todo o apoio durante os últimos anos.

Aos professores da Poli com quem tive o privilégio de conviver e aprender.

Aos colegas e funcionários da Poli com quem sempre pude contar durante esta trajetória.

Aos meus pais, Clandia e João Renato, que sempre foram a minha base, minha fortaleza e nunca mediram esforços para me proporcionar as melhores oportunidades. Ao meu irmão, Virgílio, que sempre esteve ao meu lado.

Ao meu marido, Gabriel, que é o meu maior incentivador e que me apoiou incondicionalmente durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

GOMES, B. M. **Avaliação simplificada do ciclo de vida de estacas geotérmicas de baixo carbono**. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Em edifícios típicos de concreto armado, o volume de concreto das fundações representa grande parte do total do uso do material, sendo um fator relevante para o impacto ambiental do edifício. Este trabalho estimou, por meio do método simplificado de avaliação do ciclo de vida (ACV), a energia e o CO₂ incorporados de uma estaca convencional em hélice contínua e analisou o potencial de emissão de CO₂ da fundação quando um sistema de bomba de calor acoplado ao solo (*ground coupled heat pump*) é instalado em fundações profundas. Além disso, o estudo estimou a redução no impacto ambiental da estrutura quando o concreto convencional é substituído por uma formulação inovadora baixa em pegada ambiental – concreto de baixo carbono. Desta forma, uma estaca convencional e uma estaca geotérmica foram dimensionadas para compor as fundações do edifício CICS *Living Lab* e as emissões de CO₂ e energia incorporada de cada um dos cenários foram avaliados. O sistema geotérmico acoplado permitiu a substituição do consumo de eletricidade por energia geotérmica, portanto foram analisados os tempos de retorno da energia e CO₂ incorporados de toda a fundação, bem como o tempo de retorno apenas para restituir o investimento do sistema geotérmico. O estudo concluiu que a introdução do sistema geotérmico provoca um aumento marginal da energia e CO₂ incorporados na fundação e em um horizonte de 50 anos, espera-se que o sistema reduza 15 tCO₂e e 175 GJ. Já aplicação de um concreto inovador de baixo carbono resultou em uma redução de 39% no CO₂ incorporado e de 41% na demanda acumulada de energia em comparação com fundações feitas com concreto convencional. O estudo ainda pode demonstrar a diferença na emissão de CO₂ quando o sistema faz uso de vergalhões de aço virgem ou vergalhões com alto teor de aço reciclado. Por fim, ainda foram discutidas oportunidades de melhorias para o sistema apresentar melhor desempenho.

Palavras-Chave: Avaliação Do Ciclo De Vida, Desempenho Ambiental, Construção Sustentável, Concreto De Baixo Carbono, Energia Geotérmica, Aço reciclado, Fundações;

ABSTRACT

GOMES, B. M. **Avaliação simplificada do ciclo de vida de estacas geotérmicas de baixo carbono**. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

In typical reinforced concrete buildings, the volume of concrete in the foundations represents a large part of the total material use, being a relevant factor for the environmental impact of the building. This work estimated, using the simplified method of life cycle assessment (LCA), the embodied energy and CO₂ of a conventional pile in continuous auger and analyzed the potential of CO₂ emission of the structure when a ground source heat pump (GSHP) is installed in deep foundations. Furthermore, the study estimated the reduction in the structure's environmental impact when conventional concrete is replaced by an innovative formulation with low environmental footprint – low carbon concrete. In this way, a conventional pile and an energy pile were designed to compose the foundations of the CICS *Living Lab* building and the CO₂ emissions and embodied energy of each of the scenarios was evaluated. The coupled geothermal system allowed the replacement of electricity consumption by geothermal energy, so the payback times for energy and CO₂ incorporated throughout the foundation were analyzed, as well as the payback time just to refund the investment in the geothermal system. The study concluded that the introduction of the geothermal system causes a marginal increase in energy and CO₂ embodied in the foundation and over a 50-year horizon, the system is expected to reduce 15 tCO₂e and 175 GJ. Application of an innovative low-carbon concrete resulted in a 39% reduction in embodied CO₂ and a 41% reduction in cumulative energy demand compared to foundations made with conventional concrete. The study also demonstrates the difference in CO₂ emission when the system makes use of virgin steel rebar or rebar with a high recycled steel content. Finally, opportunities for improvements were discussed for the system to perform better.

Keywords: Life Cycle Assessment, Environmental performance, Sustainable Construction, Low Carbon Concrete, Geothermal Energy, Foundations, Recycled steel;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	14
2.1.1	ACV Simplificada	15
2.2	ENERGIA GEOTÉRMICA	16
2.2.1	Bombas de calor geotérmicas	17
2.3	EFICIÊNCIA DO SISTEMA GEOTÉRMICO	18
2.3.1	Sistema de bomba de calor acoplada ao solo (GSHP)	20
2.3.2	Sistema GSHP em fundações profundas	20
2.4	MATERIAIS QUE COMPÕE OS SISTEMAS	22
2.4.1	Concreto convencional	22
2.4.2	Concreto de baixo carbono	23
2.4.3	Aço reciclado e aço virgem	24
3	METODOLOGIA	26
3.1	ESTUDO DE CASO	27
3.2	DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS ESTUDADOS	27
3.3	DEFINIÇÃO DO ESCOPO DO ESTUDO DE ACV SIMPLIFICADA	30
3.4	ELABORAÇÃO DO INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA	31
3.5	FATORES DE EMISSÃO E CONSUMO	33
3.6	TEMPO DE RETORNO DE ENERGIA E CO ₂	34
4	RESULTADOS	36
4.1	INVENTÁRIO DE QUANTIDADES E FATORES DE EMISSÃO	36
4.2	IMPACTO DA INTRODUÇÃO DO SISTEMA GEOTÉRMICO	39
4.3	POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DAS FORMULAÇÕES DE CONCRETO	41
4.4	CONTRIBUIÇÃO DO TRANSPORTE E MAQUINÁRIOS DE ESCAVAÇÃO	43
4.5	TEMPO DE RETORNO DO SISTEMA GEOTÉRMICO DAS ESTACAS GEOTÉRMICAS DO CICS	44
5	DISCUSSÃO	48
6	CONCLUSÃO	52
7	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

No âmbito da Agenda 2030, a ação climática foi definida como um aspecto relevante para fazer parte dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), adotados pelos países para reduzir o impacto das mudanças climáticas no planeta. No que diz respeito ao setor da construção civil, é urgente tomar medidas para reduzir o impacto ambiental. O setor é um grande contribuinte quando se trata de emissões de CO₂, uma vez que sozinho é responsável por mais de 20% das emissões globais de CO₂ (RILEM, 2020). Os principais materiais utilizados no setor são não renováveis e são extraídos da natureza em larga escala para que se possa atender toda a demanda da construção. Paralelo a uma demanda crescente de materiais no setor, existe um crescente impacto ambiental no planeta devido a extração crescente de matérias primas e acúmulo de resíduos, problema amplamente discutido na literatura.

Para alcançar a redução do impacto ambiental gerado por ambientes construídos, é preciso que sejam selecionados processos e materiais mais ecoeficientes, que gerem um menor impacto e apresentem igual ou melhor desempenho que os materiais comumente empregados, e que sejam implantados na estrutura sistemas que possam mitigar consumos e emissões durante a fase de uso da edificação. Neste cenário, duas rotas são viáveis: (a) redução absoluta das emissões através da alteração da tecnologia utilizada; (b) redução relativa de emissões, adicionando novas funções a um componente e, portanto, o impacto será dividido entre as funções.

Segundo grandes construtoras brasileiras, em prédios típicos de estrutura de concreto armado, o volume de concreto das fundações representa de 14 a 26% do total empregado em uma edificação, sendo uma porção fundamental na contribuição do impacto ambiental da edificação. Ao considerar os diferentes tipos de fundações de construção, as estacas em hélice contínua são de longe uma das tecnologias mais utilizadas no mundo (BOTTIAU, 2006; HOSNY; IBRAHIM; FRAIG, 2016; VAN IMPE, 2003; ZAYED, 2005). É o tipo de estaca predominante no mercado brasileiro e muito relevante no mundo todo.

Estudos anteriores sobre emissão de carbono relacionados a fundações na construção destacam a importância da escolha de materiais como contribuintes para o impacto ambiental da estrutura (AYELDEEN; NEGM, 2015; LUO; SANDANAYAKE; ZHANG, 2019; MISRA; BASU, 2012; PUJADAS-GISPERT et al., 2020; SANDANAYAKE et al., 2017; SANDANAYAKE; ZHANG; SETUNGE, 2016; ZHANG; WANG, 2016). No entanto, eles não abordam especificamente a diferença potencial no impacto ambiental quando a composição do concreto usado em fundações profundas é alterada. Por essa razão, o presente estudo discute o uso de uma formulação de concreto com menor pegada ambiental.

Uma mudança na formulação do concreto pode reduzir o impacto ambiental associado às estacas hélice contínua e de outros tipos de fundações de concreto, e consequentemente da edificação como um todo. O concreto de baixo carbono prova ser uma ótima alternativa para reduzir as emissões de CO₂ deste material. Com base na otimização do empacotamento de partículas, o concreto de baixo carbono é uma formulação inovadora de concreto, que permite substituir clínquer e outros materiais cimentícios suplementares por materiais inertes (fíler), reduzindo a demanda de água e produzindo concreto com baixa emissão de CO₂ (JOHN et al., 2018).

Além da mudança na composição dos materiais, a inclusão de estacas de energia geotérmica para um sistema de bomba de calor acoplado ao solo ou sistema GCHP (*ground coupled heat pump*, em inglês), utilizado para aquecimento e resfriamento de edifícios, poderia ser uma oportunidade viável de incorporar energia renovável em edifícios durante sua fase de operação e reduzir a emissão de gases de efeito estufa (MARAGNA; LOVERIDGE, 2021). Os sistemas GCHP fornecem maior eficiência energética em comparação com os sistemas convencionais (ZHAI et al., 2011) por troca de calor com o solo através de um circuito fechado. Além disso, o uso dessa tecnologia de energia limpa e simples de executar adicionaria outra função às fundações do edifício.

Uma vez que as estacas têm função estrutural e são peças inacessíveis, portanto, quase impossíveis de substituir, a instalação de tubos de troca de calor para sistemas GCHP nas estacas aproveitaria a estrutura enterrada já existente e ainda excluiria a necessidade de perfurações profundas adicionais apenas para este fim. A edificação em

fase de operação se beneficia em larga escala com o uso de energia renovável e disponível no solo enquanto o impacto da incorporação dos tubos de trocadores de calor nas estacas é ínfimo em comparação com toda a estrutura.

Amplamente utilizado em países europeus para aquecimento e resfriamento de ambientes (WALCH et al., 2022), há raros casos de uso de energia geotérmica superficial em países de clima tropical quente (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020), especialmente para sistemas de resfriamento. No entanto, o aumento populacional acelerado gera uma demanda diretamente proporcional no consumo de energia para climatização.

Uma grande quantidade do consumo de energia elétrica relacionada aos edifícios é usada para alimentar sistemas de ar-condicionado (EPE, 2018). Estima-se que em 2035 o consumo de energia elétrica em sistemas de ar-condicionado aumente para 36,8 TWh (BRASIL, 2018), este número representa aproximadamente o dobro do consumo registrado em 2017. Neste cenário, investir em tecnologias inovadoras para a redução do consumo de energia elétrica é fundamental (MORAIS et al., 2020). O uso de estacas de fundação como sistema geotérmico se apresenta como uma alternativa atraente para reduzir o consumo convencional de fontes de energia e as emissões de CO₂.

1.1 OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo estimar por meio do método simplificado de avaliação do ciclo de vida (ACV), a emissão de CO₂ e a energia incorporada em estacas hélice contínua convencionais e analisar a potencial redução do impacto ambiental da estrutura através da instalação de sistemas de energia geotérmica superficiais nas fundações. Além disso, o estudo visa estimar o impacto ambiental devido ao uso de tecnologia inovadora na formulação do concreto, substituindo o concreto convencional por concreto de baixo carbono.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que mede quantitativamente o impacto ambiental de um produto ao longo do seu ciclo de vida. Para isso, contabilizam-se os fluxos de matéria e energia que entram e saem dos processos pertencentes ao ciclo de vida do produto, incluindo as etapas de extração de recursos naturais, produção, transporte, uso e descarte ou reaproveitamento. Estes fluxos são convertidos em determinados indicadores de impacto ambiental (por exemplo, potencial de aquecimento global, expresso em quilogramas de dióxido de carbono equivalente). Sob a ótica ambiental, a ACV estabelece inventários tão completos quanto possível dos fluxos associados a um sistema produtivo e permite a comparação de sistemas entre si, sob a forma de impactos ambientais (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006).

Dessa forma, a ACV é, atualmente, a ferramenta mais aceita para a tomada de decisões com base em um entendimento sistêmico e quantitativo dos potenciais impactos ambientais (JOHN, 2017). Por meio dela é possível identificar as atividades de um sistema que possuem maior impacto – por exemplo, as etapas de maior consumo de insumos e geração de resíduos. Isso permite propor ações de melhorias no processo de forma assertiva (OLIVEIRA, 2016).

Segundo as normas ISO 14040 e ISO 14044, a metodologia de ACV consiste em quatro etapas analíticas distintas: definição do objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação do impacto e interpretação dos resultados (ABNT, 2009a, 2009b). Trata-se, ainda, de um processo considerado multidisciplinar pois sua realização requer conhecimento da área em que será aplicada e sobre o levantamento dos impactos ambientais potenciais, de modo a definir adequadamente os objetivos e o sistema analisado (OLIVEIRA, 2016).

No contexto da construção civil, a ACV pode ser considerada uma ferramenta confiável para avaliação do desempenho ambiental das edificações. A metodologia pode ser aplicada às tomadas de decisão a fim de melhorar a sustentabilidade na indústria da construção (ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009). Uma vez que permite a

comparação dos impactos ambientais de produtos equivalentes em sua função, a ACV consegue indicar qual opção apresenta potencialmente a melhor relação entre desempenho e impacto ambiental (HABERT et al., 2012; ROHDEN; GARCEZ, 2018). Além disso, permite que a empresa, cujo processo produtivo é estudado, conheça-se melhor, já que proporciona a identificação das etapas mais eficientes e as que podem ser aperfeiçoadas (OLIVEIRA, 2016). A Avaliação do Ciclo de Vida é um método que se aprende durante sua execução, pois depende do sistema de produto estudado, sendo importante utilizá-lo com discernimento, além de bom conhecimento das suas vantagens e limitações (VENTURA, 2012).

2.1.1 ACV Simplificada

A ACV tradicional realiza uma abordagem do “berço ao túmulo” e pretende avaliar todas as etapas da vida do produto para estimar seus impactos ambientais (CURRAN, 2006). Para que a metodologia seja aplicada de maneira integral é necessário fazer o mapeamento de centenas de fluxos associados ao desenvolvimento do produto e que estes sejam observados por tempo significativo, bem como estimar os impactos futuros resultantes das fases de uso e pós-uso, o que no setor de construção civil envolve muito tempo – entre 50 e 100 anos – e grande incerteza.

A demasiada quantidade de medidas e informações necessárias para realizar uma ACV completa torna o método custoso, demorado e complexo (GRAEDEL, 1998). É comum então que grande parte das medidas não seja feita pelo fabricante e seus fornecedores, e sim que se baseie em dados previamente publicados ou disponíveis em bancos de dados e literatura internacionais. No entanto, o uso de dados secundários é problemático, pois em muitos casos não podem ser considerados representativos nos sistemas estudados.

Uma possibilidade para que a ACV resulte em benefícios ambientais reais em larga escala seria a sua popularização, através do desenvolvimento de modelos simplificados

ancorados também em declarações ambientais (AGOPYAN; JOHN, 2011; JOHN, 2012; TAKANO et al., 2015; ZABALZA BRIBIÁN; ARANDA USÓN; SCARPELLINI, 2009).

O Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) apresentou como alternativa de simplificação a Avaliação de Ciclo de Vida modular (ACV-m), que se baseia em cinco aspectos mínimos que podem ser identificados em qualquer processo: consumo de energia, consumo de água, consumo de matérias-primas, geração de resíduos e emissão de CO₂. O projeto da ACV-m incentiva os setores produtivos a fornecer seus dados para a criação de um banco de dados que permita a consulta de critérios ambientais. A partir das informações adicionadas ao banco, é possível que produtos de mesma função possam ser comparados através de uma metodologia comum, com base em dados primários (CBCS, 2013). Considerado um projeto piloto, a metodologia ACV-m foi aplicada no setor de blocos de concreto para alvenaria e para pavimento, estimando faixas – fatores mínimos e máximos – dos cinco indicadores mínimos. Seus resultados foram divulgados em um relatório final, onde, através dos dados fornecidos pelas empresas participantes, foram calculados os principais indicadores ambientais referentes aos produtos mais representativos no mercado nacional. Tal abordagem ainda deu origem a uma proposta de método prático para a realização da avaliação do ciclo de vida de edificações (JOHN et al., 2020), ratificando que o uso de uma ACV simplificada é uma ferramenta importante para a medição e divulgação dos impactos ambientais no setor da construção civil.

2.2 ENERGIA GEOTÉRMICA

A energia geotérmica pode ser definida de forma literal como o calor contido dentro da Terra que gera fenômenos geológicos em escalas planetárias, no entanto, hoje, a energia geotérmica é usada para indicar a porção da energia térmica disponível para ser explorada pelo homem (DICKSON; FANELLI, 2004). Embora algumas regiões do mundo possam apresentar maior concentração de calor no solo, a energia geotérmica está disponível em toda a superfície do planeta. O seu uso pode variar de acordo com as condições geológicas e climáticas de cada local, mas por se tratar de uma fonte contínua de energia, pode ser empregada em sistemas de aquecimento e resfriamento, bem como em outros sistemas que fazem uso de energia elétrica.

A sua empregabilidade em diferentes formatos, portanto, tem o potencial de contribuir para a redução da emissão de gases de efeito estufa uma vez que é classificada como uma energia renovável e sustentável (VILELA, 2004). Embora o Brasil tenha como principal componente da matriz energética a energia hidroelétrica – energia limpa –, é urgente que novas fontes de energia renovável sejam exploradas para que seja possível suprir a demanda energética crescente no país.

2.2.1 Bombas de calor geotérmicas

As bombas de calor são sistemas empregados principalmente para a transferência de calor de um ambiente (fonte) para outro. Em nosso dia a dia, diversos equipamentos de resfriamento, como ar-condicionado, *freezer* e geladeiras, funcionam como bombas de calor: retiram o calor do interior de um cômodo ou do próprio equipamento e direcionam para o exterior.

O sistema de bomba de calor funciona geralmente através de um circuito fechado por onde há a circulação de um fluido responsável pelas trocas térmicas. No entanto, o uso deste sistema para climatização de ambientes requer o consumo de uma grande quantidade de energia elétrica para entrar em funcionamento. Uma das alternativas encontradas para a redução deste consumo é o sistema de bombas de calor geotérmicas (*Geothermal Heat Pump*) ou bombas de calor acopladas ao solo (traduzido de *Ground Source Heat Pump* ou GSHP).

As bombas de calor geotérmicas podem ser consideradas uma tecnologia emergente, no entanto o seu primeiro uso foi registrado em 1930 nos Estados Unidos (VILELA, 2004). O sistema consiste em trocar a energia térmica presente no solo para realizar uma bomba de calor com fim de climatizar a edificação. A depender do clima do local onde o sistema foi instalado ou até mesmo da época do ano, o sistema pode ser utilizado tanto para aquecimento como para resfriamento.

2.3 EFICIÊNCIA DO SISTEMA GEOTÉRMICO

(VIEIRA et al., 2020) detalhou as possibilidades do uso de fontes geotérmicas em um país climático tropical quente e apontou que o uso de geotérmico raso para a produção de aquecimento e resfriamento pode ser amplamente explorado.

Para o *CICS Living Lab* a demanda de energia é para resfriamento do espaço. Neste caso, o sistema com uma bomba de calor acoplada ao solo (GSHP) foi simulado para controlar a temperatura de algumas salas no edifício CICS Living Lab. Esta simulação será feita usando o *Energy Plus* versão 9.1 (DOE, 2019) juntamente com o *Open Studio* versão 2.8 (OPENSTUDIO, 2020). Um modelo de construção CICS é implementado utilizando o *Open Studio*, onde são introduzidas as informações do sistema construtivo, ocupação, iluminação, energia elétrica relativa ao funcionamento dos equipamentos previstos para a fase de uso e, ainda, as características do sistema de ar-condicionado. Os dados climáticos da cidade de São Paulo são obtidos a partir de *Climate.OneBuilding.Org* (CLIMATE.ONEBUILDING.ORG, 2020) em um formato EPW, próprio de simulações com o *Energy Plus*.

Em primeiro lugar, é realizado um teste de resposta térmica (TRT) em uma estaca de tubos de aço (mais profundo e com diâmetro menor) para obter a temperatura do solo e a condutividade térmica do solo onde está localizado o CICS. Este teste indicou uma temperatura média do solo ao longo da profundidade da estaca de 24°C. Para a atual simulação de estaca geotérmica em hélice contínua foi utilizada uma taxa de troca de calor recomendada de 35W/m² (BRANDL, 2013). Este valor é sugerido para estudos gerais de viabilidade e na fase de pré-projeto de fundações com energia geotérmica que detalham estacas maiores que 60 cm de diâmetro. Além disso, também são realizadas avaliação da condutividade térmica terrestre e da capacidade térmica volumétrica, fornecendo, respectivamente, 2,6 W/m.K e 2.347 MJ/m³. K, com aproximadamente 18% de incerteza.

Já a eficiência dos sistemas GSHP é determinada pelo coeficiente de desempenho ou COP (em inglês *coefficient of performance*). O COP é a razão da energia de saída dividida pela energia de entrada, ou seja, um COP de 4,7 significa que a unidade GSHP produziu quatro unidades de energia de resfriamento para cada unidade de entrada de energia

elétrica. Geralmente, o COP pode variar de 3 a 6 a depender das características do solo, profundidade de instalação, clima da área e outros fatores (COCCHI; CASTELLUCCI; TUCCI, 2013).

O prédio analisado possui em suas fundações 13 estacas geotérmicas com um comprimento ativo de 11 m equipado com tubos PEAD no modelo U triplo resultando em um total de 143 metros de tubos. Para simular a rejeição de calor através da bomba de calor acoplada ao solo, as seguintes características foram definidas:

- COP nominal (coeficiente de desempenho): 4,7;
- Bomba térmica reversível com uma bomba de água variável para a primeira volta;
- Distribuição de ar com bobinas de ventilador em cada sala atendida pelo sistema geotérmico;
- Área condicionada: 155 m²;
- Raio da estaca: 0,35 m;
- Capacidade térmica do solo: 2,6 W/m.K;
- Capacidade térmica volumosa do solo: 2.347 MJ/m³.K;
- Diâmetro externo da tubulação: 32 mm;
- Espessura do tubo: 3 mm;
- Distância do tubo U (centro ao centro): 0,25 m;
- Condutividade térmica da tubulação: 0,39 W/m.K;
- Condutividade térmica do concreto: 1,69 W/m.K;

O sistema desenvolvido, não tem capacidade de realizar a climatização da área total da edificação devido a quantidade limitada de estacas. Portanto, a área condicionada foi definida com base na faixa de rejeição de calor (35W/m²) resultando em 155m². O resto da área do edifício é climatizado por um sistema de resfriamento condensado de água com uma COP nominal de 4,7 com uma distribuição de ar com bobinas de ventilador em cada sala servida por este sistema chamado aqui como sistema de ar-condicionado convencional.

A estimativa das emissões de dióxido de carbono para geração de energia elétrica foi realizada considerando o fator médio anual de emissão de CO₂ para a eletricidade brasileira (MCTIC, 2023), fatores de construção e emissão de margem operacional foram ponderados. As médias dos anos anteriores de 2018 a 2022 foram calculadas resultando em um fator de 0,29 kgCO₂/kWh.

2.3.1 Sistema de bomba de calor acoplada ao solo (GSHP)

Uma das formas de extrair a fonte energética do solo é a instalação de um sistema fechado. Este sistema é formado por um conjunto de tubos distribuídos ao longo da área explorada onde há a circulação interna de um fluido – geralmente água – para a realização das trocas térmicas entre o solo e o ambiente. Neste formato, o funcionamento da bomba de calor requer o funcionamento de dois circuitos: primário e secundário. O circuito primário corresponde ao sistema de tubulações, enquanto o sistema secundário é locado na própria edificação com o objetivo de garantir a climatização dos ambientes desejados.

O uso de GSHP é amplamente difundido em regiões como Estados Unidos e Europa principalmente com o objetivo de aquecimento. Em regiões de clima tropical e subtropical, onde a demanda por climatização corresponde em maior escala por resfriamento, existem atualmente menos projetos e pesquisas na área.

2.3.2 Sistema GSHP em fundações profundas

As fundações de estacas são usadas para apoiar uma ampla gama de estruturas, incluindo pontes, edifícios, estruturas marinhas, dentre outras. Por estarem em contato com o solo, podem ser caracterizadas como geoestruturas termoativas. Deste modo, quando equipadas com tubos para veicular as operações de troca de calor, são adequadas para explorar a energia geotérmica superficial disponível no solo, reduzindo o consumo de energia elétrica.

Quando os tubos trocadores de calor são acoplados em estruturas de fundações profundas, como estacas, há uma economia em perfurações específicas para a instalação do sistema no solo, ou seja, os tubos do sistema primário passam a ser

instalados juntamente com a execução das estacas e funcionariam como sistemas GSHP verticais. Por outro lado, as fundações passam a ter não só uma função estrutural como passam a ser também um sistema geotérmico.

Outras vantagens podem ser citadas quando ambos os sistemas são integrados. Primeiramente, o concreto é um excelente condutor térmico, tendo propriedades térmicas melhores que a areia e o graute, materiais comumente utilizados para preencher as perfurações exclusivas para inclusão dos tubos trocadores de calor. Além disso, ao unir os dois sistemas, a necessidade de usar uma área do terreno exclusivamente para essa furos trocadores de calor é dispensada.

As Figura 1 e Figura 2 ilustram como o sistema é acoplado às estacas. Os tubos trocadores de energia – geralmente em poliestireno de alta densidade (PEAD) – responsáveis pela circulação do fluido são presos na armadura da estaca antes da instalação. Depois que esta armadura é locada dentro da perfuração, a concretagem das estacas acontece de forma convencional.

Figura 1 - Armadura de reforço com tubos PEAD



Fonte: Mario Takeashi

Figura 2 - Conexões triplas de tubos U



Fonte: Mario Takeashi

2.4 MATERIAIS QUE COMPÕE OS SISTEMAS

2.4.1 Concreto convencional

Sociedades modernas e desenvolvidas exigem um ambiente construído que é inimaginável sem o uso generalizado de materiais à base de cimento que permitem a construção em qualquer lugar, a baixo custo, de formas complexas e maciças. Nos últimos 65 anos, a quantidade de cimento produzido aumentou quase 34 vezes, enquanto a população aumentou menos de 3 vezes (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). O uso de materiais é um processo complexo comandado pelo crescimento da população e pela prosperidade econômica (KRAUSMANN et al., 2009), portanto considerando um crescimento ainda acelerado dos países em desenvolvimento, é preciso que sejam implementados métodos para reduzir as emissões de CO₂ da produção de cimento, já que persistindo o atual cenário, a indústria de cimento seria responsável por cerca de um terço das emissões antropogênicas de CO₂ em 2050 (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018).

É inviável que se renuncie aos principais materiais que a construção civil utiliza atualmente devido à grande demanda e a limitação de oferta escalável (JOHN, 2017); portanto, as pesquisas encontradas na literatura que comparam impactos ambientais de tecnologias construtivas feitas com diferentes materiais não produzem solução eficaz em larga escala. Para efetivamente promover a sustentabilidade na construção, é necessário considerar a utilização de todos os materiais em funções nas quais são ótimos e, simultaneamente desenvolver melhorias que os tornem cada vez mais eficientes e sustentáveis.

As fundações, que compõem o elemento estrutural do edifício que transfere as cargas para o solo, são atualmente em sua maioria executadas em concreto armado. No entanto, raramente são avaliadas ambientalmente, apesar do impacto de seus materiais ser bastante significativo (ONDOVA; ESTOKOVA, 2016). Por serem uma grande porção do total da massa da estrutura, a otimização das fundações profundas em termos ambientais pode reduzir o impacto da construção, contribuindo para diminuir o aquecimento global

(PUJADAS-GISPERT et al., 2020). Nesse cenário, foi estudado o uso do concreto de carbono.

2.4.2 Concreto de baixo carbono

Em busca de melhores resultados, nos últimos anos o setor vem reduzindo as emissões de CO₂ principalmente com a utilização de escória granulada de alto forno e cinzas volantes como substitutos do clínquer, material responsável por aproximadamente 90% do consumo de energia e da emissão de CO₂ na produção de cimento devido à etapa de calcinação (decomposição térmica do calcário), necessária para sua fabricação. No entanto, tanto no Brasil como no mundo, a oferta de escória de alto forno e cinzas volantes é limitada, o que torna necessário o desenvolvimento de outras soluções para diminuir a pegada de carbono de materiais cimentícios.

Pesquisas recentes demonstram que com a redução progressiva da disponibilidade dos tradicionais substitutos do clínquer, um aumento na adição de fíler no cimento é a solução com o maior potencial de mitigação (ABCP, 2019). Como os fíleres são materiais de baixo impacto ambiental, a sua introdução permite uma substancial redução da pegada de CO₂ dos materiais cimentícios (PILEGGI; JOHN; REBMANN, 2018).

Quanto a utilização do cimento, os fíleres são abordados como uma opção favorável, uma vez que colaboram com uma de suas funções essenciais: formar uma pasta que preenche o espaço entre os grãos de agregados, dando coesão e fluidez ao sistema. Logo, tem potencial para aumentar a eficiência do uso do cimento, reduzindo a quantidade de material reativo e de alto impacto ambiental necessária para formular produtos.

O concreto de baixo carbono (PILEGGI; JOHN; REBMANN, 2018), portanto, se apresenta como uma alternativa para a redução do impacto ambiental gerado pelo setor, uma vez que substitui ligantes por fíleres, permitindo a mitigação de CO₂ na cadeia do cimento a baixo custo e, simultaneamente, otimizando o desempenho dos produtos cimentícios.

As normalizações europeias para a composição do concreto, desde os anos 90, já utilizam o limite de 35% de fíleres, enquanto no Brasil, a norma vigente limita o uso do componente a valores entre 5 e 25% (ABNT, 2019). Já em relação à aplicação prática de fíleres, existe um número crescente de estudos pelo mundo que retratam a aplicação de alto teor de fíleres em concretos e os resultados mostram que é possível de substituir até 70% dos ligantes com uma combinação de fíleres (JOHN et al., 2018) sem comprometer expressivamente o desempenho mecânico. Isso significa compensar a diluição do aglutinante através de uma redução na quantidade de água de mistura exigida para alcançar o comportamento reológico desejável. Isso não é simples; na verdade, a resposta reológica de uma mistura torna-se cada vez mais difícil de controlar quando o teor de água é reduzido.

A estratégia simples para alcançar uma redução na demanda de água é aumentar o empacotamento de partículas, resultando em um menor volume de vazios interpartículas que precisam ser preenchidos com água. A abordagem de maximização do empacotamento não é particularmente inovadora na indústria cimenteira (FURNAS, 1931) e orienta os pesquisadores ainda hoje.

O concreto de baixo carbono é uma tecnologia em desenvolvimento e os seus benefícios econômicos e ambientais dependem da superação de barreiras tecnológicas e de mercado. Do ponto de vista da pesquisa, os desafios estão relacionados a uma melhor compreensão de como controlar e projetar formulações considerando o desempenho global ao longo da vida útil (PILEGGI; JOHN; REBMANN, 2018).

2.4.3 Aço reciclado e aço virgem

O aço é um material importante em diversos setores da indústria mundial. Estima-se que a produção global de aço cresça aproximadamente 30% entre 2017 e 2050 (PEE et al., 2018). A produção de ferro e aço é responsável por aproximadamente 5% das emissões globais de gases de efeito estufa (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019), sendo grande parte desta produção usado em estruturas de concreto armado.

Quando falamos em fundações, o aço é um componente bastante importante. Além das estruturas de concreto armado, o aço está presente em outros tipos de estruturas como

os perfis metálicos e estacas tubulares feitos essencialmente em aço. Além disso, o aço utilizado para este fim é raramente substituído, perdurando até o fim da vida útil da edificação.

Atualmente, as produções de aço virgem e de aço de reciclado correspondem por 71 e 29% da produção global de aço, respectivamente (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2019). Embora o uso de vergalhões de aço reciclado seja difundido em todo o mundo, as barras de aço virgens são usadas no setor da construção civil em larga escala em diversos locais como China, Índia e África (PEE et al., 2018).

O aço virgem sempre terá participação na produção do aço destinado a construção. Primeiramente, o aço virgem é um componente importante na composição química do material. Normas regulatórias, como a ABNT NBR 7480, estipulam conteúdos máximos para a inclusão de determinados elementos metálicos no aço. Em um segundo momento, é inegável que o uso de aço para a construção teve um aumento significativo em volume nos últimos anos devido ao acelerado desenvolvimento das cidades. Esse aumento na produção de estruturas em concreto armado faz com que a produção deste material hoje seja muito superior ao aço reciclado produzido há alguns anos atrás. Portanto, a produção que chega hoje ao final da sua vida útil e que será reciclado não chegará em volumes suficientes de sucata para suprir a demanda de novas produções.

Por outro lado, é importante priorizar alternativas que reuam o máximo possível o material que chega no fim da sua vida útil. Grandes empresas mundiais atualmente já tem o processo de reciclagem de aço incorporada em seus processos, chegando a uma eficiência de 85% (ARCELOR MITTAL BRASIL S.A., 2018), isto é, apenas 15% de material virgem é adicionado para a fabricação de novos vergalhões. Aumentar a participação do aço reciclado na produção total do material representa uma oportunidade significativa para reduzir as emissões do setor (HARVEY, 2021). A reciclagem não só é responsável por uma economia expressiva de energia e matéria-prima, como significa uma redução de energia empregada para a fabricação do material.

3 METODOLOGIA

Nesta pesquisa foi realizado o inventário de materiais e energia consumidos para a execução das 13 estacas hélice contínuas que compõe a fundação do CICS *Living Lab*. O inventário foi levantado através da coleta de dados que ocorreu em duas fases principais: (1) na concepção do projeto executivo e (2) após a execução das estacas *in loco*.

Primeiramente o projeto das fundações do CICS foi idealizado de maneira convencional, isto é, apenas com finalidade estrutural e concreto convencional. Essa concepção foi importante para que um cenário de referência fosse criado. Os dados das estacas convencionais foram levantados através dos dimensionamentos indicados no projeto.

Já para as estacas que de fato foram executadas, foram levantados dados reais após a execução. O consumo de cimento, a profundidade da escavação das estacas, a quantidade de aço e combustível usado pelo maquinário são dados reais. A quantidade de tubos PEAD foi estimada.

Diferente da ACV tradicional, a emissão de CO₂ e o consumo de energia serão analisados, nesta pesquisa, como resultados de impactos ambientais. Estes impactos são estimados diretamente através dos dados coletados – e pelos dados secundários referentes a alguns insumos – da seguinte forma:

- Energia incorporada: calculada a partir dos dados informados pelas empresas sobre o consumo de eletricidade e combustíveis nas fases de processamento de matérias primas e produção do material.
- Emissão de CO₂: obtida a partir do consumo de energia elétrica, combustíveis, distâncias de transporte de insumos e do produto ao local de aplicação, CO₂ procedente de extração e processamento de materiais.

Para que fosse possível evidenciar a diferença na contribuição de cada tipo de concreto e da inclusão do sistema de energia geotérmica nos indicadores analisados, cenários foram analisados.

3.1 ESTUDO DE CASO

O objeto de estudo deste trabalho são as fundações em estacas hélice contínuas do *CICS Living Lab*, um edifício de salas e laboratórios que está em fase de construção no *campus* da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Uma vez que o edifício foi projetado para receber e explorar tecnologias inovadoras na construção civil, foi possível implantar soluções ainda pouco difundidas para o projeto de fundação, incluindo a aplicação de concreto com baixa pegada ambiental e a inclusão do sistema de bomba de calor geotérmico.

O prédio que receberá o *CICS Living Lab* conta com um novo edifício, uma construção já existente e uma escada em estrutura metálica – que fará a ligação entre as duas edificações. O escopo desse estudo abrange as fundações dimensionadas para receber a porção da nova edificação que terá dois andares, uma área total de 553m² e será toda executada em concreto armado. Para a fundação, foram dimensionadas 13 estacas hélice contínua. A Figura 3 ilustra o *CICS Living Lab*.

Figura 3 - Perspectiva 3D do prédio do *CICS Living Lab*



Fonte: (CICS, 2019)

3.2 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS ESTUDADOS

Em um primeiro momento, as estacas do *CICS Living Lab* foram dimensionadas de maneira convencional com propósito de servirem apenas para função estrutural. As

estacas convencionais teriam uma profundidade de 16 metros, armaduras de aço de 6 metros de comprimento, sem o uso de sistema geotérmico.

Em seguida, por se tratar de um centro de inovação, decidiu-se pela incorporação do sistema de bomba de calor acoplado ao solo para a climatização da edificação. Para isso, foi proposto o aumento do comprimento da armadura das estacas para que os tubos trocadores de calor pudessem atingir maior profundidade e uma maior área de contato com o solo, garantindo uma maior eficiência do sistema. As estacas geotérmicas foram dimensionadas com a mesma profundidade de 16 metros, armaduras de aço de 12 metros e tubos trocadores de calor em PEAD no arranjo U triplo com comprimento de 11 metros.

Quanto ao material utilizado para a concretagem das peças de fundação, o projetista da fundação optou por ser conservador e sugeriu o uso de um concreto com um consumo de cimento de 600kg/m^3 no caso das fundações geotérmicas CICS. Essa alternativa foi levantada para compensar um possível aumento da quantidade de água de mistura para atingir os requisitos reológicos necessários para inserir a gaiola de aço de 12 metros de comprimento no concreto fresco – armadura mais rígida que o habitual. No entanto, para estacas hélice contínua, é usual que seja empregado um concreto convencional com teor de cimento relativamente menor. Para esse estudo foi considerado um consumo de 400kg/m^3 para o concreto convencional.

Já o concreto de baixo carbono surge como uma alternativa para a redução dos impactos ambientais da estrutura em concreto armado. O uso do concreto de baixo carbono vem sendo amplamente estudado e teve as estacas geotérmicas do CICS como sua primeira aplicação em estrutura real. Este concreto alternativo apresenta uma substituição de 52% no teor de cimento por materiais inertes (fíleres) em comparação com o concreto convencional, gerando uma redução de 46% na pegada de carbono por metro cúbico de concreto. Além da grande diferença no teor do cimento, ambos os concretos sofrem acréscimo aditivo polifuncional – geralmente trata-se de uma mistura de aditivos –, enquanto somente o concreto de baixo carbono é acrescido de aditivo superplastificante. A Tabela 1 - Tabela descritiva dos insumos utilizados para fabricação de 1m^3 de (a)

concreto convencional e (b) concreto de baixo Tabela 1 discrimina cada componente utilizado na produção do concreto e suas quantidades.

Tabela 1 - Tabela descritiva dos insumos utilizados para fabricação de 1m³ de (a) concreto convencional e (b) concreto de baixo carbono com substituição de 52% de cimento por fíleres

Insumo	Concreto convencional (kg/m³)	Concreto de baixo carbono (kg/m³)
Agregado graúdo	892	936
Areia artificial	232	245
Areia natural	537	568
Cimento CP-V-RS	400	191
Água	228	171
Aditivo polifuncional I	2,61	-
Aditivo polifuncional II	-	3,59
Fíler calcário I	-	115
Fíler calcário II	-	94
Superplastificante	-	0,8
Teor de ar (%) ⁽¹⁾	2,00	3,68

(1) Medido através do método gravimétrico.

Neste cenário, as estacas foram estudadas quanto às suas quantidades de aço, tipo de concreto empregado e o uso do sistema geotérmico (tubos PEAD), conforme Tabela 2. A estaca geotérmica com concreto de baixo carbono e aço reciclado correspondente ao cenário real das estacas hélice contínua do CICS.

Tabela 2 - Características dos cenários estudados

Cenários	Comprimento do aço		Concreto		Geotermia	
	6 metros	12 metros	Convencional	Baixo carbono	Sim	Não
Estaca convencional	x		x			x

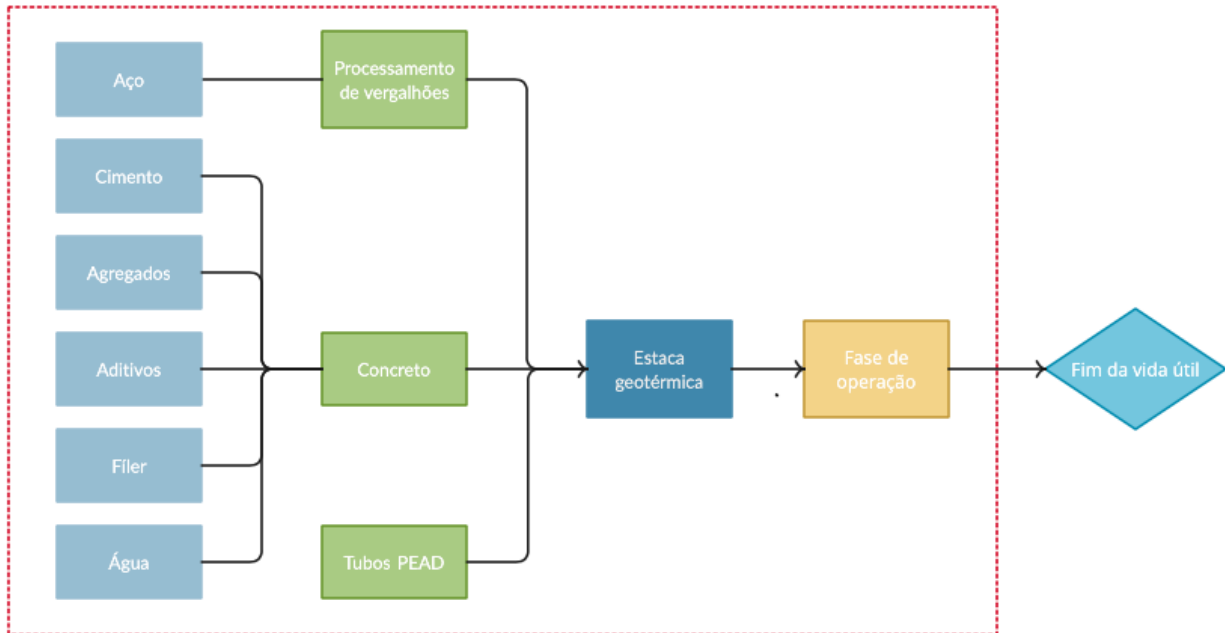
Estaca geotérmica convencional		x	x		x	
Estaca geotérmica de baixo carbono (CICS)		x		x	x	

Por fim, os cenários foram estudados considerando o uso do aço reciclado e do aço virgem. A diferença em emissão de CO₂ relativa a cada um dos materiais foi calculada e analisada.

3.3 DEFINIÇÃO DO ESCOPO DO ESTUDO DE ACV SIMPLIFICADA

Os limites do sistema de produtos estudados incluem a extração e produção de matéria-prima, a produção de peças de concreto, processamento e transporte dos insumos, a fase operacional do sistema e o fim da vida útil, conforme mostrado na Figura 4. A fase de funcionamento das estacas foi considerada porque, embora todas as estacas estudadas tenham potencialmente o mesmo comportamento, é nesta fase que o sistema geotérmico gerará retornos. No entanto, a fase pós-uso não foi considerada, pois todas são baseadas em concreto armado, portanto têm cenários semelhantes de fim de vida. Para a vida útil da estrutura foram considerados 50 anos.

Figura 4 - Limites do sistema estudado. Exemplo do cenário 3.



Fonte: autor.

A unidade funcional (UF) selecionada e utilizada ao longo deste estudo foi um sistema geotérmico raso instalado em 13 estacas hélice contínua capaz de atender à demanda de resfriamento parcial do CICS *Living Lab*. O estudo incorporou um período de 50 anos, que é considerado o tempo útil da estrutura. Na modelagem do sistema, os impactos relacionados à fabricação de bombas e condicionadores de ar não foram considerados.

3.4 ELABORAÇÃO DO INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

O primeiro passo para o desenvolvimento do inventário é a elaboração do levantamento quantitativo dos materiais especificados para os cenários de estacas considerados. Em um segundo momento, o inventário foi elaborado medindo o consumo de materiais a partir dos dados levantados nos projetos, dos dados industriais e informações coletados durante a execução das estacas, e utilizou os fatores de emissão e consumo dos insumos para calcular a energia incorporada e a emissão de CO₂.

Em seguida, é necessário estimar também as quantidades de matérias primas consumidas para a composição de cada insumo utilizado na produção, incluindo as perdas. Para o desenvolvimento do inventário desta pesquisa, o levantamento quantitativo dos materiais e energia utilizados considerou os seguintes itens:

- a) O consumo real do concreto obtido diretamente dos boletins de cravação gerados pelo maquinário usado para perfurar e executar as estacas;
- b) A quantidade de matérias-primas e energia utilizadas para produzir concreto estimada depois que as formulações do concreto convencional e de baixo carbono foram disponibilizadas pela empresa responsável por ambas as formulações;
- c) A quantidade de vergalhões de aço usadas para construir as estacas geotérmicas foi levantado;
- d) As quantidades de matérias primas e energia consumidas para o processamento dos vergalhões de aço;
- e) A quantidade de aço especificada pelo projetista para construir uma estaca convencional sem a instalação do sistema de energia geotérmico, contabilizada através da especificação original dada pelo projetista;
- f) A quantidade de tubos plásticos HDPE utilizados para a instalação do sistema geotérmico.
- g) O consumo de combustível para deslocamento dos insumos até o canteiro de obras, estimado através das distâncias de transporte;
- h) O consumo do combustível pelo para operação das máquinas responsáveis pela execução das estacas.

O consumo dos materiais e energia utilizados no concreto, foram disponibilizados pela *Intercement*, empresa responsável pela formulação e fabricação de ambos as alternativas: concreto de referência (convencional) e concreto de baixo carbono. Os limites do sistema considerados foram: (a) obtenção de materiais e pré-processamento, (b) produção e (c) distribuição. Os dados de uso e fim de vida não foram incluídos nos indicadores. Em posse dos dados de consumo de concreto, foi possível calcular o consumo de energia e emissão de CO₂ de ambas as alternativas.

O aço considerado nesta pesquisa é produzido no Brasil pela Arcelor Mittal utilizando matéria-prima mineral nacional. De acordo com a Declaração de Produto Ambiental (DAP) de vergalhões de aço, os limites do sistema consideraram: (a) provisão de recursos, aditivos e energia; (b) transporte de recursos e aditivos para o local de produção; (c) processos produtivos no local, incluindo energia, produção de aditivos, descarte de resíduos de produção e consideração de emissões relacionadas; e (d) reciclagem de sucata de produção e fabricação (ARCELOR MITTAL BRASIL S.A., 2018). Considerando sua produção total de aço, 85% são reciclados no final da vida útil, evitando a produção de vergalhões de aço a serem feitos de materiais virgens, reduzindo o impacto ambiental do material. Já os indicadores utilizados na modelagem do uso do material reciclado consideraram o conjunto de dados "*produção de barras de aço, RoW*" disponível na base *Ecoinvent*.

3.5 FATORES DE EMISSÃO E CONSUMO

Os fatores de emissão para a produção de aço e cimento foram os disponibilizados pelos fornecedores. O uso de dados primários é importante, pois geram indicadores que refletem adequadamente os impactos ambientais causados pelos produtos analisados. Para os fatores de emissão de combustíveis e processos secundários, como extrações de matérias-primas, foram modelados utilizando o banco de dados *EcoInvent* (versão 3.4) com o sistema de alocação *cut-off*, que não atribui cargas ambientais aos resíduos. Esses dados são considerados secundários e, por vezes, geram resultados que não correspondem à realidade do sistema, o que compromete a precisão dos indicadores. No entanto, o uso desses dados torna a avaliação do desempenho ambiental viável quando a cadeia de suprimentos não possui suas próprias informações.

Para o cálculo dos impactos ambientais do concreto convencional e do concreto de baixo carbono foram consideradas as produções de matérias-primas utilizadas, variações nas distâncias de transporte de matérias-primas e concreto usinado para o canteiro de obras do CICS.

A quantidade de aço foi calculada de acordo com o projeto desenvolvido para estacas convencionais (6 metros de comprimento) e estacas geotérmicas (12 metros de comprimento). A quantidade de aço utilizada para cada tipo de estaca foi contabilizada e adicionada ao inventário.

O transporte de concreto e aço foi realizado por meio de caminhões. O consumo de combustível (diesel) foi obtido por litros por tonelada de matéria prima e, nesta modelagem, o caminho de volta a fábrica não foi considerado.

Os dados de inventário demonstram a energia incorporada, as emissões de potencial de aquecimento global (kgCO₂-eq) e emissão de CO₂ (kg) dos materiais utilizados. As emissões de CO₂ foram consideradas iguais a 88% do total de GWP dos materiais – considerando o conjunto de dados *Ecoinvent*. Além disso, a eletricidade consumida durante todo o processamento de matérias-primas e a produção de concreto foram calculadas considerando dados da matriz energética brasileira em 2019.

3.6 TEMPO DE RETORNO DE ENERGIA E CO₂

Para avaliar o benefício da inclusão de geotérmica em fundações profundas, o tempo de retorno do sistema foi calculado para ambos os indicadores (energia e CO₂). O *Energy Payback Time* (EPBT) foi apresentado como o período necessário para que um sistema de energia renovável gere a mesma quantidade de energia que foi utilizada para produzir o próprio sistema (FTHENAKIS; KIM, 2012) e é representado pela Equação 1.

$$EPBT = \frac{E_{construção}}{E_{operação}} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde $E_{construção}$ é a energia necessária para produzir os materiais e fabricar o sistema; $E_{operação}$ é a energia anual da rede elétrica que a geotérmica substitui.

Um conceito similar foi aplicado às emissões de CO₂. O *Carbon Payback Time* (CPBT) é o período necessário para que um sistema de energia renovável economize a mesma quantidade de CO₂-equivalente (CO₂-e) que foi emitida na produção do próprio sistema (Equação 2).

$$CPBT = \frac{CO_{2construção}}{CO_{2saved}} \quad (\text{Eq. 2})$$

onde $CO_{2_{construção}}$ é o CO_2 emitido na produção dos materiais, operação dos maquinários de escavação e construção do sistema; $CO_{2_{saved}}$ é o CO_2 anual gerado pela energia da rede elétrica que deixa de ser consumida pelo uso da energia geotérmica.

4 RESULTADOS

4.1 INVENTÁRIO DE QUANTIDADES E FATORES DE EMISSÃO

Para que fosse possível fazer o levantamento dos indicadores de energia incorporada e emissão de CO₂ para os principais materiais deste estudo, foi necessário investigar os fatores de emissão e consumo presentes na composição de cada um deles (Os fatores referentes aos processos associados ao concreto e aço reciclado foram fornecidos diretamente pelo fabricante. Para que fosse viável a inclusão dos demais materiais na estimativa, os fatores do aço virgem e dos tubos PEAD foram utilizados dados secundários, retirados diretamente da base de dados *EcoInvent*).

Tabela 3). Os fatores referentes aos processos associados ao concreto e aço reciclado foram fornecidos diretamente pelo fabricante. Para que fosse viável a inclusão dos demais materiais na estimativa, os fatores do aço virgem e dos tubos PEAD foram utilizados dados secundários, retirados diretamente da base de dados *EcoInvent*.

Tabela 3 – Emissão de CO₂-eq e energia incorporada dos principais materiais

Indicador	Descrição	Valor	Unidade	Fonte
Concreto convencional				
Energia incorporada	Energia elétrica usada no processo	174,9	MJ/m ³	Intercement (adaptado)
Energia incorporada	Combustíveis	1597,5	MJ/m ³	
Emissão de CO ₂	Processos “berço-ao-tumulo”	356,2	kg CO ₂ -eq/m ³	
Emissão de CO ₂	Transporte	5,98	kg CO ₂ -eq/m ³	
Concreto de baixo carbono				
Energia incorporada	Energia elétrica usada no processo	87,2	MJ/m ³	Intercement (adaptado)
Energia incorporada	Combustíveis	762,8	MJ/m ³	
Emissão de CO ₂	Processos “berço-ao-tumulo”	193,6	kg CO ₂ -eq/m ³	
Emissão de CO ₂	Transporte	10,2	kg CO ₂ -eq/m ³	
Aço reciclado (85% de material reciclado)				
Energia incorporada	Energia elétrica primária renovável	2440	MJ/t	Declaração Ambiental de Produto – Barras de aço reforçado CA50, ArcelorMittal Brasil (adaptado)
Energia incorporada	Energia elétrica primária não renovável	5754	MJ/t	
Emissão de CO ₂	Potencial de aquecimento global	789,7	kg CO ₂ -eq/t	
Emissão de CO ₂	Transporte	37,1	kg CO ₂ -eq/t	
Aço virgem				
Emissão de CO ₂	Potencial de aquecimento global	2191,4	kg CO ₂ -eq/t	<i>EcolInvent</i>
Tubos PEAD				
Emissão de CO ₂	Potencial de aquecimento global	1,96	kg CO ₂ -eq/kg	<i>EcolInvent</i>

Com relação ao concreto, o mesmo volume foi inventariado para concreto convencional e concreto de baixo carbono. A dimensão real das estacas foi levantada utilizando os dados extraídos dos boletins de cravação emitidos pelo maquinário utilizado para a execução das estacas do CICS. A profundidade das estacas em hélice contínua teve uma variação entre 15,12 e 16,32 metros, resultando em um consumo total de concreto de 93,6m³ de concreto para as 13 estacas, como mostra a Tabela 4. Esse volume é aproximadamente 17% mais do que o volume estimado considerando as dimensões de

projeto, 70 centímetros de diâmetro e 16 metros de profundidade para todas as estacas, que resultaria num total de 80m³ de concreto. Não foi contabilizada qualquer sobra de concreto – bomba ou caminhão –, ou seja, o volume apresentado reflete apenas na quantidade de concreto empregada na estrutura.

Tabela 4 - Comprimento e consumo de concreto teóricos e reais das estacas hélice contínua executadas

Estaca	Comprimento teórico estaca (m)	Comprimento real estaca (m)	Volume de concreto teórico (m³)	Volume de concreto real (m³)
1	16,0	16,32	6,16	7,2
2	16,0	16,32	6,16	7,7
3	16,0	15,12	6,16	6,9
4	16,0	16,24	6,16	7,0
5	16,0	16,24	6,16	7,2
6	16,0	16,32	6,16	7,3
7	16,0	16,32	6,16	7,6
8	16,0	16,24	6,16	7,0
9	16,0	16,32	6,16	7,1
10	16,0	16,32	6,16	7,3
11	16,0	16,42	6,16	7,4
12	16,0	16,24	6,16	7,0
13	16,0	16,16	6,16	6,7
Volume total de concreto (m³)			80,0	93,6

Para vergalhões de aço, o total foi calculado conforme especificado no projeto para estacas convencionais e medido como construído para estacas de energia. A diferença na quantidade de aço para ambas as estacas foi identificada e discriminada no inventário.

O levantamento quantitativo do aço, concreto e tubos PEAD utilizados nos cenários considerados por este estudo, bem como suas contribuições para os indicadores de energia incorporada, potencial de aquecimento global e emissão de CO₂ foram compilados na Tabela 5. A emissão de CO₂ foi considerada igual a 88% do total do potencial de aquecimento global de cada material.

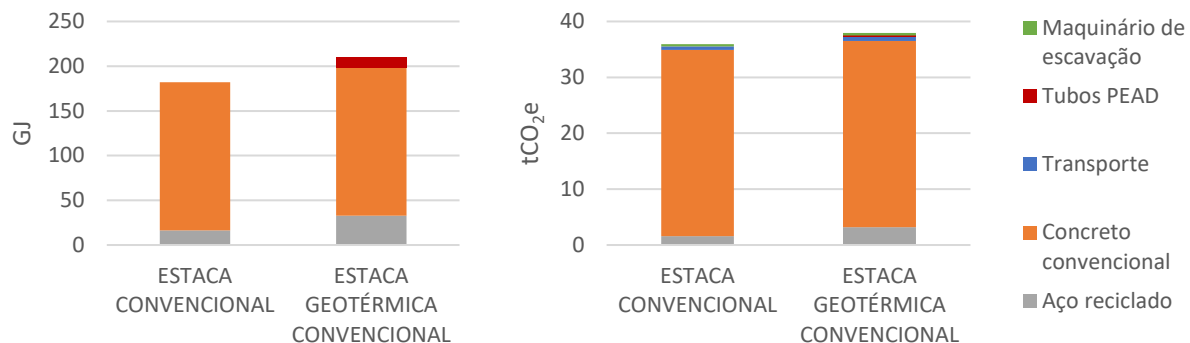
Tabela 5 - Inventário de energia incorporada, potencial de aquecimento global e emissão de CO₂ do sistema considerando seus principais componentes

	Quantidade	Energia incorporada (GJ)	Potencial de aquecimento global (tCO ₂ e)	Emissão de CO ₂ (tCO ₂)
Concreto				
Concreto convencional	93,6 m ³	166	33,4	29,3
Concreto de baixo carbono	93,6 m ³	79	18,1	15,9
Aço				
Para estacas geotérmicas	4.015 kg	32,9	3,2	2,8
Para estacas convencionais	1.980 kg	16,2	1,6	1,3
Tubos PEAD	138 kg	12	0,27	0,24

4.2 IMPACTO DA INTRODUÇÃO DO SISTEMA GEOTÉRMICO

Devido à inserção do sistema geotérmico nas fundações, duas mudanças principais foram necessárias: o comprimento da gaiola de aço e a fixação dos tubos de PEAD (bombas de aquecimento e conexões posteriores não foram consideradas). A extensão do comprimento das gaiolas de aço nas estacas geotérmicas significou um aumento de 2,6 toneladas no aço total do projeto de fundação. Esse aumento na quantidade de aço, significou um aumento de 16,7 GJ da energia incorporada na construção das estacas e 1,6 tCO₂e na emissão de carbono quando comparado à quantidade de aço na armadura da estaca convencional (Figura 5). Essa quantidade significou um aumento de 51% em ambos os indicadores.

Figura 5 – Energia incorporada (esquerda) e emissão de CO₂ (direita) da estaca convencional e da estaca geotérmica convencional



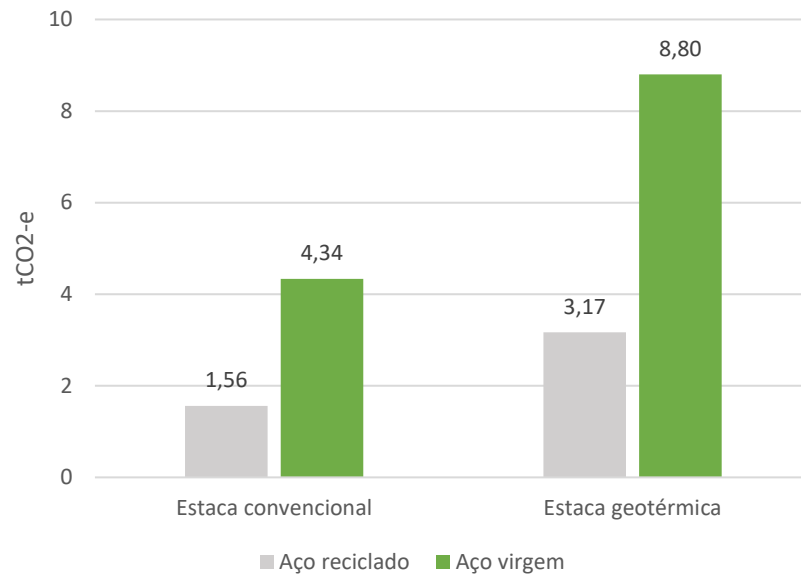
Fonte: autor.

Para os tubos de PEAD considerados no cenário de pilha de energia, considerou-se um fator de emissão de 1,96 tCO₂e/kg. A quantidade utilizada neste estudo de caso foi pequena, sendo necessário utilizar 819 m de material. O material contribuiu com aproximadamente 5,5% do consumo total de energia das estacas geotérmicas e menos de 1% do total de CO₂ incorporado. O material teve uma contribuição marginal em relação a todo o cenário.

Assim, pode-se afirmar que o aumento do impacto das estacas foi proporcional ao aumento do comprimento das armaduras de aço devido à inserção dos tubos de PEAD. Além disso, o impacto variou de acordo com a pegada de CO₂ do vergalhão de aço, que foi influenciada pelo conteúdo reciclado e pela rota de produção.

Neste estudo de caso, utilizou-se o aço reciclado de produção brasileira o qual foi declarado com um fator de emissão de 789 kgCO₂ por tonelada de aço, enquanto para o aço virgem é estimado um valor de 2191 kgCO₂ para a mesma quantidade de material. Isto é, o material reciclado apresentou um potencial de emissão (CO₂-eq) aproximadamente três vezes menor do que o do aço fabricado a partir de matérias-primas virgens. A Figura 6 demonstra que, para os dois cenários considerados neste estudo, ou seja, para os dois volumes de vergalhões de aço estudados, o uso de aço virgem aumenta severamente o potencial de emissão de CO₂ do sistema.

Figura 6 - Emissão de CO₂ no uso de aço virgem e aço reciclado para a estaca convencional e estaca geotérmica



Fonte: autor.

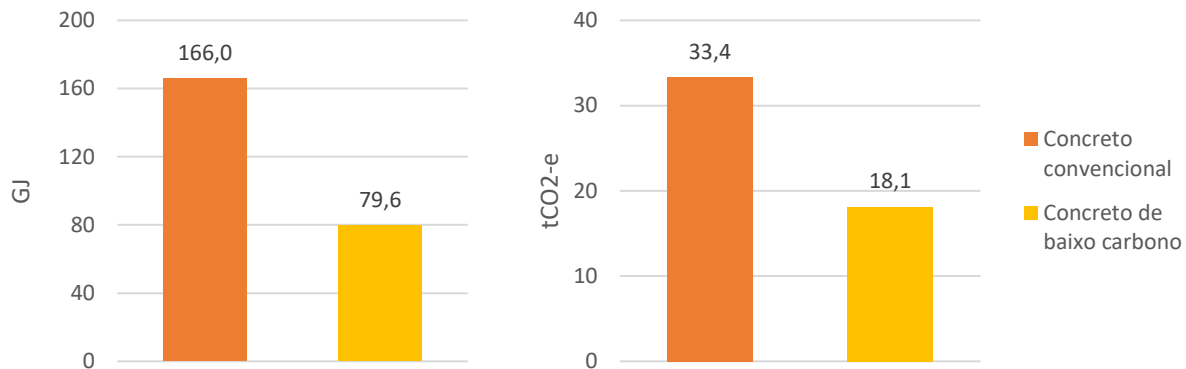
4.3 POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DAS FORMULAÇÕES DE CONCRETO

Embora a extensão das barras de aço tenha contribuído para o aumento dos indicadores de impacto analisados por este estudo, o concreto se apresentou como o componente de maior contribuição na energia incorporada em todos os cenários estudados. Assim, a incorporação de uma solução com menor impacto ambiental sobre o material foi crucial para o caso de fundação do CICS. Uma vez que a quantidade de concreto permaneceu constante em todos os cenários é notável a disparidade dos materiais tanto no total de energia incorporada, como na emissão de CO₂.

Para os cenários estudados, 166 GJ de energia seriam utilizados para produzir um metro cúbico de concreto convencional, enquanto a produção do mesmo volume de concreto de baixo carbono requer 79,6 GJ, assim, seu uso pode reduzir a contribuição do material para a energia incorporada em 52% (Figura 7). Em relação ao CO₂ incorporado, o concreto de baixo carbono atinge 18,1 tCO₂/m³, resultando em uma redução de 46% no indicador quando comparado ao concreto convencional, que apresenta uma emissão de

33,4 tCO₂/m³. Isso significa que implementar novas tecnologias em concreto em peças que utilizam largas escalas do material, é uma solução urgente para a redução das emissões através da seleção de materiais.

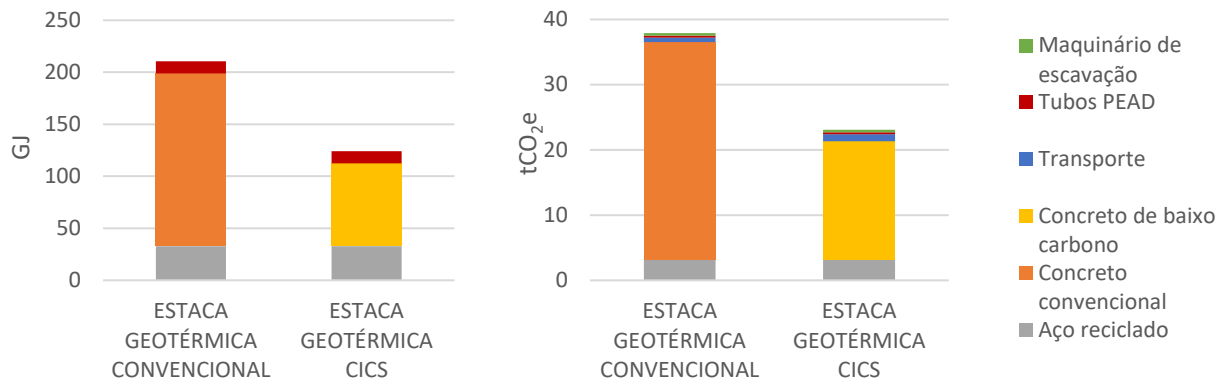
Figura 7 - Contribuição do concreto convencional e concreto de baixo carbono na energia (esquerda) e CO₂ incorporados (direita)



Fonte: autor.

Como a quantidade de concreto permaneceu constante em todos os cenários analisados, foi possível perceber diferença significativa no potencial de impacto cumulativo do sistema quando as estacas de energia convencional foram comparadas com as estacas CICS (Figura 8). A mudança do tipo de concreto possibilitou uma redução de 41% na energia incorporada ao sistema, que passou de 210,5 para 124,1 GJ. Para o CO₂ incorporado, as 37,9 tCO₂e do sistema geotérmico convencional diminuíram para 23,1 tCO₂e com o uso de concreto de baixo carbono, resultando em uma redução de 39% nas emissões totais geradas pela construção das fundações. Isso implica que a implementação de novas tecnologias de concreto em estruturas que utilizam concreto em larga escala é uma solução urgente para a redução de emissões por meio da seleção de materiais.

Figura 8 - Demanda de energia incorporada (esquerda) e CO2 incorporado (direita) de uma estaca geotérmica convencional e a estaca geotérmica CICS



Fonte: autor.

4.4 CONTRIBUIÇÃO DO TRANSPORTE E MAQUINÁRIOS DE ESCAVAÇÃO

Assim como o concreto, a quantidade do combustível utilizado no maquinário de escavação das estacas hélice contínua foi a mesma para todos os cenários. Isso se deu pois o comprimento da estaca se manteve constante para todos os cenários. Para que o consumo de diesel fosse calculado, foram utilizados os boletins de cravação das 13 estacas estudadas para levantar o tempo que o maquinário trabalhou e a eficiência conhecida do maquinário. Neste item também foi incluído o consumo de diesel do transporte do maquinário pesado até o canteiro de obras e o seu retorno ao pátio.

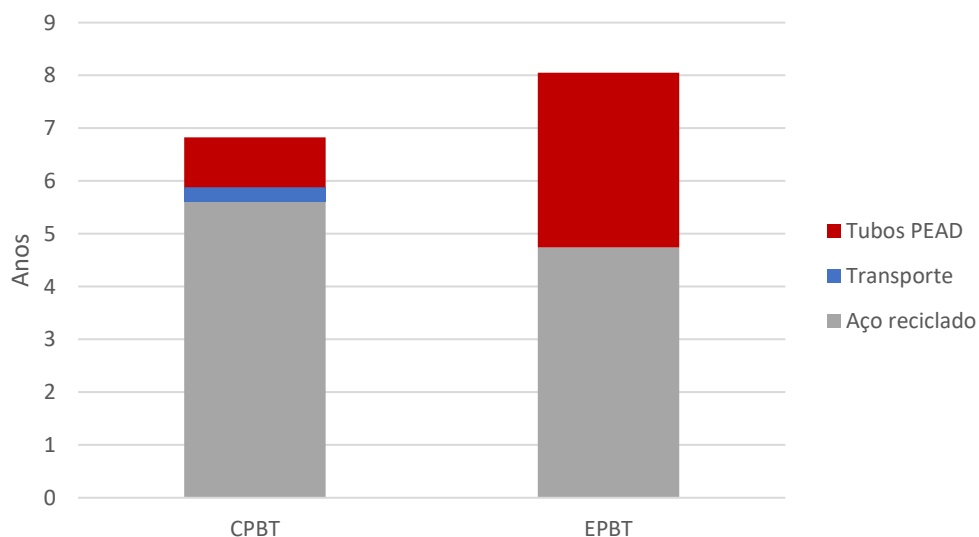
Com o intuito de estimar o combustível utilizado no transporte dos materiais, os trajetos para aço e concreto foram simulados através do Google Maps, assim foi possível entender as distâncias percorridas em cada etapa do percurso – da fábrica até o canteiro de obras e vice-versa. Uma vez que o fator de emissão de do diesel é expresso em ton.km, o transporte variou também de acordo com a quantidade e composição (densidade) do material.

4.5 TEMPO DE RETORNO DO SISTEMA GEOTÉRMICO DAS ESTACAS GEOTÉRMICAS DO CICS

Os dados da simulação realizada para prever a eficiência da inserção da bomba de calor nas estacas resultou em uma geração de energia de 3515,1 MJ ou 3,5 GJ por ano em comparação com o cenário de referência. Isso significa que, por meio do sistema geotérmico, toda a energia investida nas fundações pode ser recuperada ao longo dos anos. O tempo que um sistema geotérmico deve operar antes de recuperar a energia investida ao longo de sua vida útil é estimado usando o EPBT.

No entanto, o GSHP é um sistema acoplado a um elemento estrutural pré-existente – fundações. Portanto, é apropriado analisar os impactos, CPBT e EPBT apenas para o que foi inserido na fundação para possibilitar o sistema de energia geotérmica. O sistema GSHP dimensionado para este projeto demandou o aumento de 2,6 t na quantidade de aço, 819 m de tubos de PEAD e um acréscimo de 75,5 kgCO₂e no indicador de transporte, enquanto os demais elementos das fundações permaneceram constantes. Essa contribuição adicional representou 1,9 tCO₂e e 28,3 GJ, ou seja, um CPBT de 6,8 anos e um EPBT de 8 anos (Figura 9).

Figura 9 - CPBT e EPBT dos materiais adicionados para o sistema GSHP nas estacas geotérmicas



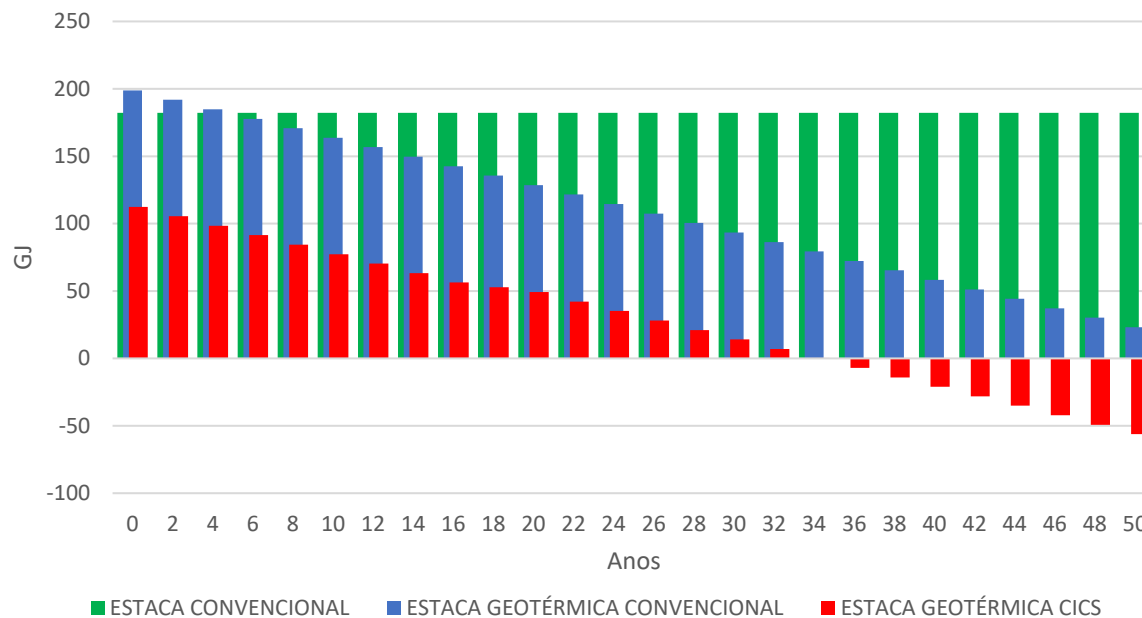
Fonte: autor.

Para a construção de toda a fundação convencional em hélice contínua seriam utilizados 182,2 GJ de energia considerando todo o escopo deste estudo. Ao adicionar o sistema GSHP às fundações convencionais, a contribuição de vergalhões de aço mais longos, tubos PEAD e a variação na porção de transporte aumentaram a energia acumulada da estrutura em 8,4%, resultando em 198,8 GJ. No entanto, o cenário atual (estacas geotérmicas CICS) teve uma diminuição drástica em sua construção devido ao uso de concreto de baixo carbono. O concreto de baixo carbono representou apenas 48% da energia do concreto convencional, reduzindo a energia total investida na construção das estacas CICS para 112,5 GJ.

As estacas geotérmicas convencionais atingem o EPBT após 58 anos de operação. Uma vez que a vida útil dessa estrutura é de 50 anos, aproximadamente 88% da energia incorporada seria neutralizada neste período. Diferente do cenário geotérmico anterior, a energia investida nas estacas construídas do CICS é neutralizada ainda durante a sua vida útil – aos 34 anos de uso da estrutura. Após este período, a energia incorporada ao sistema passa a ser negativa, ou seja, a estrutura gerou mais energia do que incorporou durante sua fase de construção.

A energia investida nas estacas convencionais será constante durante toda a vida útil da estrutura e não será recuperada. A Figura 10 mostra o retorno da energia investida em cada cenário ao longo dos anos.

Figura 10 - Tempo de retorno da energia incorporada a construção das estacas através da geração de energia geotérmica



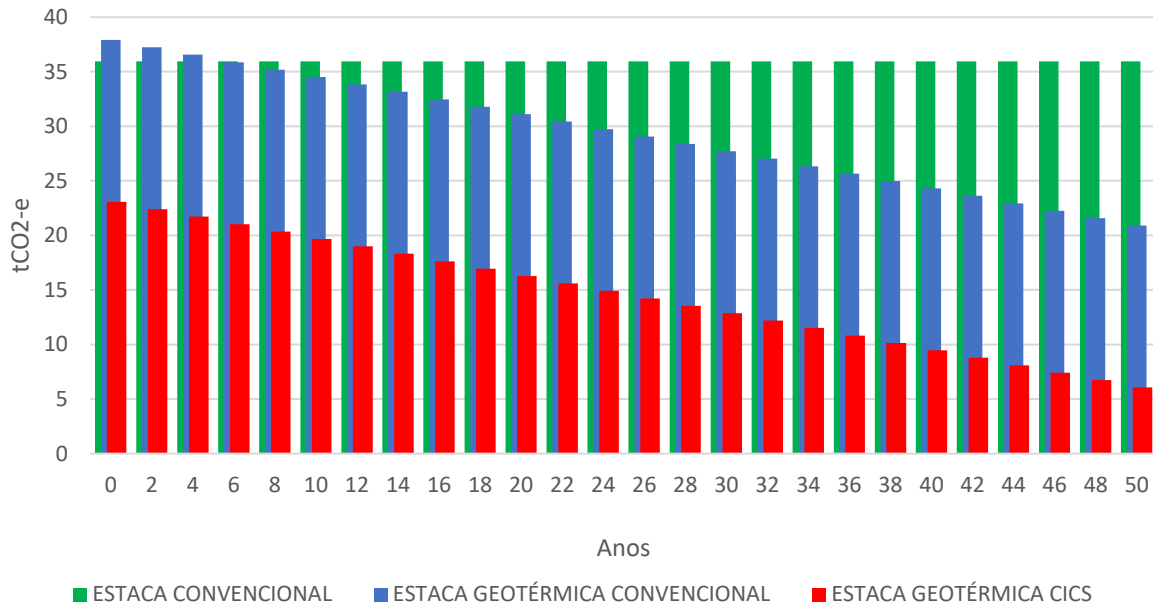
Fonte: autor.

Em relação ao CO₂ incorporado, as alternativas estudadas com o sistema geotérmico acoplado resultam em um retorno anual de 286,2 kgCO₂. Este retorno está associado com a geração de energia geotérmica, ou seja, uma vez que a energia geotérmica gera 3,5 GJ anualmente este valor deixa de ser consumido da matriz energética (eletricidade), o que reflete na intensidade das emissões de CO₂ associadas a eletricidade.

Para estacas geotérmicas convencionais, o CO₂ incorporado estimado é de 37,9 tCO₂e. No entanto, a estaca geotérmica CICS utiliza de concreto de baixo carbono e apresenta uma redução de 14,8 tCO₂e quando comparada as fundações profundas convencionais. Essa redução implica que o carbono associado ao cenário real seria neutralizado aos 66 anos de operação do edifício, enquanto a neutralização das emissões associadas às estacas geotérmicas convencionais demandaria aproximadamente 108 anos para ocorrer. Nenhum dos cenários estudados terá seu CO₂ incorporado recuperado durante o tempo de vida útil estipulado para a estrutura Figura 11, no entanto, é inegável que o

sistema geotérmico do CICS apresenta uma solução ambientalmente superior em relação aos demais cenários.

Figura 11 - Tempo de retorno do CO₂ emitido para na construção das estacas através da geração de energia geotérmica



Fonte: autor.

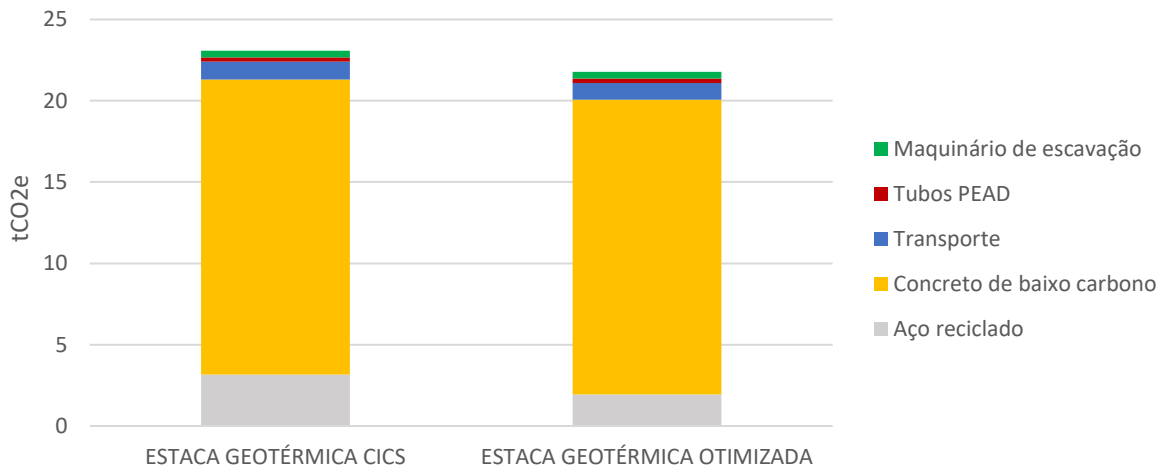
Além disso, há uma redução do consumo anual de água de 6,9 m³ prevista para o arrefecimento do sistema de resfriamento tradicional que será dispensada com o uso do sistema de energia geotérmica. Esse consumo representa 27,6% do consumo total anual de água do prédio estimado em 25m³ no período de um ano. Considerando que o consumo de água também exige energia, com base em um fator de 1,08 MJ por m³ de água, essa economia de água representa uma redução na demanda de energia de 7,45MJ e uma redução de até 0,72 kgCO₂ em um ano. Esse valor pode não representar muito na emissão total de demanda de energia e CO₂ deste estudo, mas certamente reflete uma economia significativa para o meio ambiente.

5 DISCUSSÃO

Após analisar os cenários propostos, foi possível identificar que o concreto é o principal contribuinte quando se trata da demanda de energia acumulada e emissão de CO₂ do sistema em todos os cenários. O cenário real contou com a inserção do sistema GSHP e do concreto de baixo carbono, apresentando os menores valores em ambos os indicadores estudados. No entanto, a solução implementada apresentou um aumento significativo no consumo de aço, mostrando que ainda há espaço para melhorias.

É possível supor um cenário de estacas geotérmicas otimizadas onde seria desconsiderado o aumento significativo na quantidade de vergalhões de aço para implantação de GSHP, mantendo o uso de concreto de baixo carbono. Para o cenário otimizado, seriam mantidos 9 vergalhões estruturais de aço com comprimento de 6 metros conforme indicado pelo projeto de fundação original. Já os demais 3 vergalhões de cada estaca teriam o comprimento de 12 metros para atender à necessidade de fixar os três laços de tubos de PEAD a uma profundidade de 11 metros. Estribos adicionais seriam adicionados para endurecer as barras longas. Dessa forma, em comparação com o cenário real, seria possível obter uma redução de 5,6% do total de CO₂ emitido na implantação das fundações profundas do mesmo projeto (Figura 12). Através dessa otimização, haveria também uma redução na fase de transporte já que o combustível considera o peso do material transportado, ou seja, quanto menor o volume de aço, menor a emissão total do cenário.

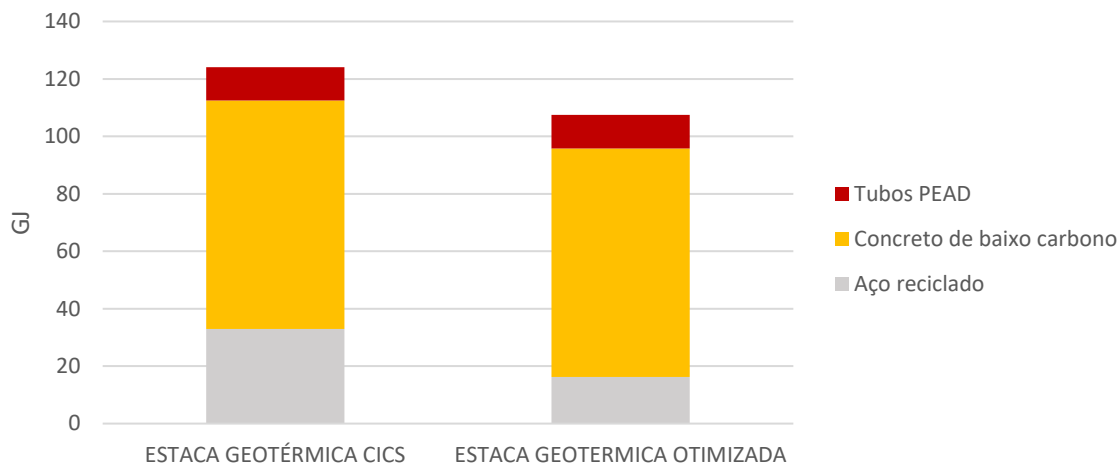
Figura 12 - Demanda de carbono incorporado de uma estaca geotérmica CICS e a estaca geotérmica otimizada



Fonte: autor.

Já ao se tratar da energia incorporada do sistema, a estaca geotérmica otimizada também apresentaria melhores resultados quando comparada ao cenário real (Figura 13). A contribuição da energia incorporada passaria de 124,1 GJ para 107,4GJ, isso significaria uma redução em 13,4% do total da energia investida na execução do sistema otimizado – devido a redução do aço empregado.

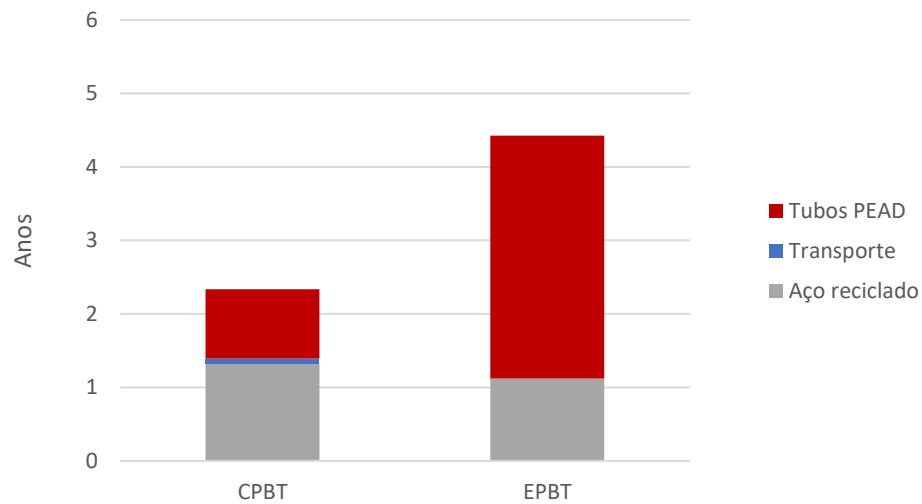
Figura 13 - Demanda de energia incorporada de uma estaca geotérmica CICS e a estaca geotérmica otimizada



Fonte: autor.

A energia salva por ambos os sistemas durante a vida útil de 50 anos da estrutura seria a mesma, isto é, ambas possuem o potencial de economizar um total de 175 MJ durante sua fase de operação. Comparado ao cenário de pilha de energia do CICS, no cenário otimizado seria possível obter uma redução no EPBT de 34 para 26 anos e no CPBT de 66 para 62 anos considerando o sistema completo. Em relação ao tempo de retorno apenas para material adicionado para operar o sistema geotérmico, em pouco tempo de operação os investimentos já teriam sido restituídos. Para neutralizar a emissão de carbono levaria cerca de 2,2 anos, enquanto a energia seria recuperada em 4,4 anos (Figura 14).

Figura 14 - CPBT e EPBT dos materiais adicionados para GSHP em estaca geotérmica otimizada



Fonte: autor.

Para que as estacas de energia otimizada se tornem realidade, é necessário buscar novas soluções de engenharia para evitar a quantidade de aço adicional inserido, mantendo a instalação de tubos de PEAD, os quais são imprescindíveis para o funcionamento do sistema. O cenário de otimização apresentado não foi testado. Outras soluções para a diminuição do aço incorporado ao sistema como a colocação dos tubos através de uma barra de aço que pode ser removida ou mesmo um suporte para tubos de PEAD em um material mais ecoeficiente são soluções que podem ser estudadas futuramente.

Os tubos de PEAD não contribuem significativamente para a emissão de CO₂ do sistema. Contar com os benefícios das estacas geotérmicas adicionando apenas esse material às fundações profundas significa deixar de sobrecarregar a matriz energética local em por um valor ínfimo.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho estima a emissão de CO₂ e a demanda cumulativa de energia necessárias para a execução de estacas hélice contínua e investiga uma redução potencial no impacto ambiental de fundações profundas no CICS *Living Lab*. Para isso, a implantação de sistema de energia geotérmica superficial utilizando fundações profundas e o uso de concreto de baixo carbono foram vistos como oportunidades. De acordo com os resultados deste estudo, destacam-se as seguintes conclusões:

1. É necessário desenvolver novas tecnologias para reduzir o CO₂ incorporado e operacional e a demanda cumulativa de energia da construção e estimar cuidadosamente seu impacto ao longo do ciclo de vida. No entanto, somente a aplicação dessas novas tecnologias em escala industrial ajudará de fato a mitigar os impactos ambientais. Este estudo de caso relata os resultados de uma aplicação piloto em uma fundação de construção real, um primeiro passo para escalar uma tecnologia inovadora.
2. As estacas de fundação têm uma contribuição substancial para os edifícios de carbono incorporado. A fundação em hélice contínua de concreto armado geralmente usa um concreto mais rico em cimento do que o resto da estrutura de concreto. Em nosso estudo de caso, a aplicação de um concreto inovador de baixo carbono – com 52% menos CO₂ incorporado – resultou em uma redução de 39% no CO₂ incorporado (14,8 tCO₂e) e de 41% na demanda acumulada de energia (86,4 GJ) da fundação em comparação com fundações feitas com concreto convencional. A aplicação deste material nas fundações do CICS *Living Lab* comprova a escalabilidade de uma nova tecnologia em concreto de baixo carbono e a experiência sugere que a tecnologia pode ser escalável nas condições atuais de mercado, usando equipamentos convencionais de produção de concreto.
3. A introdução de tubos PEAD e sistemas de suporte para geração de energia geotérmica provoca um aumento marginal do CO₂ incorporado da fundação e permitirá a colheita de energia limpa renovável geotérmica geralmente considerada carbono zero. Para o caso estudado, os tempos estimados de retorno de carbono (CBPT) e energia (EBPT) apenas para o material adicionado para funcionamento do

sistema geotérmico são respectivamente 8 e 6,8 anos após o início de operação do sistema considerando os dados da matriz energética brasileira. Para toda a estrutura da fundação real, o CPBT e o EPBT seriam alcançados após 66 e 34 anos, respectivamente. Esses valores serão validados após o início da operação do prédio. Estas são contribuições relevantes para a mitigação de CO₂ nos edifícios. Em um horizonte de 50 anos, espera-se que o sistema reduza 15 tCO₂e e 175 GJ.

4. A rede elétrica brasileira é conhecida por ter uma das menores pegadas de CO₂ do mundo e os dados apresentados neste estudo refletem seus dados. No entanto, quanto maiores as emissões de CO₂ na matriz energética de um país, maior será a economia de emissões de CO₂ que o sistema geotérmico resultará. Como a energia geotérmica é uma energia limpa, economizar eletricidade gerada por meio de fontes não renováveis significa reduzir o impacto.
5. O uso de vergalhões de aço reciclados também reduziu ainda mais 64% do CO₂ incorporado da fundação quando comparado com a fundação feita com vergalhões de aço virgem para a armação das estacas.
6. Também foi possível constatar que o sistema pode ser melhorado reduzindo seu tempo de retorno de carbono e energia incorporados. Cerca de 90% do aumento marginal do carbono e da energia incorporados associados à introdução do sistema geotérmico vêm dos 2,6 t adicionais de gaiola de vergalhão de aço necessários para suportar os tubos de HPDE. Como esse material não é necessário para função estrutural nem para a geração de energia, ele poderia ser substituído ou pelo menos reduzido ao mínimo necessário para suportar as tubulações, gerando uma fundação geotérmica mais otimizada – e barata – das estacas.

7 REFERÊNCIAS

ABCP. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria de cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro, SNIC: [s.n.]. Disponível em: <https://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2019/04/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil_Book-1.pdf>.

ABNT. **NBR 16738 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro: [s.n.].

ABNT. **ABNT NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: [s.n.].

ABNT. **ABNT NBR ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: [s.n.].

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil: Série sustentabilidade**. Edgard Blucher Ltda ed. São Paulo: [s.n.]. v. 5

ARCELOR MITTAL BRASIL S.A. **DECLARAÇÃO AMBIENTAL DO PRODUTO - Barras de Aço Reforçado**. Brazil: [s.n.]. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/certificados-politicas>>.

AYELDEEN, M.; NEGM, A. M. Global Warming Potential Impact Due to Pile Foundation Construction Using Life Cycle Assessment. **EJGE**, p. 4413–4421, 2015.

BOTTIAU, M. **Recent evolutions in deep foundation technologies**. DFI/EFFC. **Anais...**2006.

BRANDL, H. Thermo-active Ground-Source Structures for Heating and Cooling. **Procedia Engineering**, v. 57, p. 9–18, 2013.

BRASIL, M. DE M. E E. **Uso do Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e Contribuições Para o Avanço em Eficiência Energética. Nota Técnica EPE 030/2018**. Empresa de Pesquisa Energética, Brasília. , 2018.

CBCS. **Avaliação de Ciclo de Vida Modular de Blocos e Pisos de Concreto - Relatório Final**. [s.l.: s.n.]. Disponível em:

<<http://acv.cbcs.org.br/website/acvs/show.asp?ppgCode=DE0D28E8-7BDE-4495-9405-8604588186C5>>.

CLIMATE.ONEBUILDING.ORG. **Repository of free climate data for building performance simulation.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://climate.onebuilding.org/default.html>>.

COCCHI, S.; CASTELLUCCI, S.; TUCCI, A. Modeling of an Air Conditioning System with Geothermal Heat Pump for a Residential Building. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2013, p. 1–6, 2013.

CURRAN, M. A. Life Cycle Assessment: Principles and Practice. **U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY**, 2006.

DICKSON, M. H.; FANELLI, M. What is geothermal energy? 2004.

EPE. **Technical Note EPE 030/2018 – Use of Air Conditioning in the Brazilian Residential Sector: Perspectives and contributions to the advancement in energy efficiency (in Portuguese)**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.

FTHENAKIS, V. M.; KIM, H. C. Environmental Impacts of Photovoltaic Life Cycles. Em: **Comprehensive Renewable Energy**. [s.l.] Elsevier, 2012. p. 143–159.

FURNAS, C. C. Grading Aggregates - I. - Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 23, p. 1052–1058, 1931.

GRAEDEL, T. E. **Streamlined Life-Cycle Assessment**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.

HABERT, G. et al. Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete: quantification of the improvement to concrete bridges. **Journal of Cleaner Production**, v. 35, p. 250–262, nov. 2012.

HARVEY, L. D. D. Iron and steel recycling: Review, conceptual model, irreducible mining requirements, and energy implications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 138, p. 110553, mar. 2021.

HOSNY, H. E.; IBRAHIM, A. H.; FRAIG, R. F. Cost analysis of continuous flight auger piles construction in Egypt. **Alexandria Engineering Journal**, v. 55, n. 3, p. 2709–2720, set. 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Material efficiency in clean energy transitions**. [s.l.] OECD, 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Balance 2020 Edition - Database Documentation**. [s.l.] IEA, 2020. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4f314df4-8c60-4e48-9f36-bfea3d2b7fd5/WorldBAL_2020_Documentation.pdf>.

JOHN, V. **Derivation of reliable simplification strategies for the comparative LCA of individual and “typical” newly built Swiss apartment buildings**. [s.l.] ETH Zurich, 2012.

JOHN, V. M. Materiais de Construção e o Meio Ambiente. Em: **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. [s.l.] IBRACON, 2017.

JOHN, V. M. et al. Fillers in cementitious materials — Experience, recent advances and future potential. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 65–78, dez. 2018.

JOHN, V. M. et al. Proposta de método prático para avaliar o desempenho ambiental no ciclo de vida da construção. **CONCRETO & Construções**, v. ,XLVIII, n. 100, p. 48–56, 2020.

KRAUSMANN, F. et al. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. **Ecological Economics**, v. 68, n. 10, p. 2696–2705, ago. 2009.

LUO, W.; SANDANAYAKE, M.; ZHANG, G. Direct and indirect carbon emissions in foundation construction – Two case studies of driven precast and cast-in-situ piles. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 1517–1526, fev. 2019.

MARAGNA, C.; LOVERIDGE, F. A New Approach for Characterizing Pile Heat Exchangers Using Thermal Response Tests. **Energies**, v. 14, n. 12, p. 3375, 8 jun. 2021.

MCTIC. Fatores de emissão da margem de operação pelo método da análise de despacho. **Ministerio de Tecnologia, Ciencia e Inovacoes**, 2023.

MISRA, A.; BASU, D. **A Quantitative Sustainability Indicator System for Pile Foundations**. GeoCongress 2012. **Anais...**Oakland, California, United States: American Society of Civil Engineers, 29 mar. 2012. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784412121.437>>. Acesso em: 26 nov. 2020

MORAIS, T. DA S. O. et al. Effects of seasonal variations on the thermal response of energy piles in an unsaturated Brazilian tropical soil. **Energy and Buildings**, v. 216, p. 109971, jun. 2020.

OLIVEIRA, L. S. **Avaliação do ciclo de vida de blocos de concreto do mercado brasileiro: alvenaria e pavimentação**. Dissertação de Mestrado—São Paulo: Universidade de São Paulo, 14 jul. 2016.

ONDOVA, M.; ESTOKOVA, A. Environmental impact assessment of building foundation in masonry family houses related to the total used building materials. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 35, n. 4, p. 1113–1120, jul. 2016.

OPENSTUDIO. **The OpenStudio Coalition**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://openstudiocoalition.org>>.

ORTIZ, O.; CASTELLS, F.; SONNEMANN, G. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 28–39, jan. 2009.

PEE, A. DE et al. **Decarbonization of Industrial Sectors: The Next Frontier**. Amsterdam: McKinsey & Company, 2018.

PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M.; REBMANN, M. S. LEAP: concretos de baixa pegada de

CO 2 com controle avançado de desempenho. **Concreto & Construções**, v. v. 46, p. 49–57, 2018.

PUJADAS-GISPERT, E. et al. Environmental analysis of concrete deep foundations: Influence of prefabrication, concrete strength, and design codes. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118751, jan. 2020.

ROHDEN, A. B.; GARCEZ, M. R. Increasing the sustainability potential of a reinforced concrete building through design strategies: Case study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, p. e00174, dez. 2018.

SANDANAYAKE, M. et al. Estimation and comparison of environmental emissions and impacts at foundation and structure construction stages of a building – A case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 319–329, maio 2017.

SANDANAYAKE, M.; ZHANG, G.; SETUNGE, S. Environmental emissions at foundation construction stage of buildings – Two case studies. **Building and Environment**, v. 95, p. 189–198, jan. 2016.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, dez. 2018.

SOARES, S. R.; SOUZA, D. M.; PEREIRA, S. W. **Avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil: Coletânea Habitare - Construção e Meio Ambiente**. Porto Alegre: [s.n.]. v. 7

TAKANO, A. et al. Life cycle assessment of wood construction according to the normative standards. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, n. 3, p. 299–312, maio 2015.

VAN IMPE, W. Foreword: Belgian Geotechnics' Experts Research on Screw Piles. **BELGIAN SCREW PILE TECHNOLOGY DESIGN AND RECENT DEVELOPMENTS**, 2003.

VENTURA, A. Introduction to the Symposium: Life Cycle Assessment, In-between Research, Standards, Regulations and Application. **Proceedings LCA Construction**

2012, p. pg. 1-3, 2012.

VIEIRA, F. P. et al. **Updated assessment of geothermal resources in Brazil – 2020**. Reykjavik, Iceland: 2020.

VILELA, M. M. **ESTUDO DE MÉTODO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR A POTENCIALIDADE DO USO DE ENERGIA GEOTÉRMICA A BAIXA PROFUNDIDADE**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2004.

WALCH, A. et al. Shallow geothermal energy potential for heating and cooling of buildings with regeneration under climate change scenarios. **Energy**, v. 244, p. 123086, abr. 2022.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **World Steel Association in Figures 2019**. Brussels: World Steel Association, 2019.

ZABALZA BRIBIÁN, I.; ARANDA USÓN, A.; SCARPELLINI, S. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. **Building and Environment**, v. 44, n. 12, p. 2510–2520, dez. 2009.

ZAYED, T. M. Productivity and Cost Assessment for Continuous Flight Auger Piles. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 131, n. 6, p. 677–688, jun. 2005.

ZHAI, X. Q. et al. A review for the applications and integrated approaches of ground-coupled heat pump systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3133–3140, ago. 2011.

ZHANG, X.; WANG, F. Assessment of embodied carbon emissions for building construction in China: Comparative case studies using alternative methods. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 330–340, out. 2016.

APÊNDICES

Processos, fluxos e quantidades envolvidas na produção de 1 m³ de concreto convencional (referência). Fonte: Planilha CIVIA Concreto Referência (Inter cement)

Data: 10/09/2020.

Processo	Fluxo	Materiais e combustíveis	Quantidade	Unidade
Insumos da Farinha	Entrada	Argila	16,04	kg
		Minério de Ferro	4,92	kg
		Terra Contaminada	2,91	kg
	Saída	Insumos da Farinha	23,87	kg
Blend de combustíveis	Entrada	Óleo Combustível	0,15	litros
		Blend industrial sólido	7,22	kg
		Resíduo oleoso	1,56	kg
		Pneu inteiro	5,76	kg
		Carvão	0,00	kg
		Moinha de Carvão	7,61	kg
	Saída	Blend de combustíveis	22,30	kg
Insumos do Cimento	Entrada	Fosfogesso (Gesso sulfato)	3,09	kg
		Gesso mineral	30,21	kg
		Aditivo	0,24	kg
		Escória	34,63	kg
	Saída	Insumos do Cimento	68,17	kg
Insumos do Concreto	Entrada	Aditivo	3,68	kg
		Agregado miúdo	789,00	kg
		Água	228,00	kg
		Agregado graúdo	870,00	kg
	Saída	Insumos do Concreto	1890,68	kg
Obtenção de coque	Entrada	Coque de petróleo (produção Brasil)	19,44	kg
	Saída	Coque moído	19,44	kg
Diesel Pá Carregadeira	Entrada	Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	0,41	litros
	Saída	Diesel pá carregadeira	0,41	litros
Diesel Betoneira	Entrada	Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	3,35	litros
	Saída	Diesel betoneira	3,35	litros
Diesel Bomba	Entrada	Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	0,00	litros
	Saída	Diesel Bomba	0,00	litros
Diesel Moagem Agregado	Entrada	Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	0,00	litros
	Saída	Diesel moagem agregado	0,00	litros
Diesel Moagem Cimento	Entrada	Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	0,52	litros
	Saída	Diesel moagem cimento	0,52	litros

Processo	Fluxo	Materiais e combustíveis	Quantidade	Unidade
Britagem Calcário Clínquer	Entrada	Eletricidade	0,83	kWh
		Calcário	461,01	kg
	Saída	Calcário britado - clínquer	461,01	kg
Britagem Calcário Cimento	Entrada	Eletricidade	0,83	kWh
		Calcário	18,79	kg
	Saída	Calcário britado - cimento	18,79	kg
Moagem de Farinha	Entrada	Insumos da Farinha	23,87	kg
		Calcário britado - clínquer	461,01	kg
		Eletricidade	6,84	kWh
	Saída	Farinha	484,88	kg
Moagem de Coque	Entrada	Eletricidade	0,70	kwh
	Saída	Coque moído	19,44	kg
Calcinação	Entrada	Farinha	484,88	kg
		Blend de combustíveis	22,30	kg
		Coque moído	19,44	kg
		Eletricidade	11,87	kWh
		Óleo Combustível	0,15	litros
		Blend industrial sólido	110,90	MJ
		Coque	19,44	kg
		Resíduo oleoso	26,11	MJ
		Pneu inteiro	5,76	kg
		Carvão	0,00	kg
		Moinha de Carvão	7,61	kg
		Outros	0,00	MJ
		Refratário - Forno	0,21	kg
		Descarbonatação (Dióxido de Carbono)	164,45	kg
	Saída	Clínquer	313,25	kg
Moagem de Cimento	Entrada	Clínquer	313,25	kg
		Calcário britado Cimento	18,79	kg
		Insumo do Cimento	68,17	kg
		Diesel do Cimento	0,52	litros
		Eletricidade	26,00	KWh
		Aço, puro (produção Brasil)	0,03	kg
		Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	0,52	litros
	Saída	CP-V-ARI-RS	400,00	kg
Expedição	Entrada	CP-II-E-40	0,0	kg
		Eletricidade	0,48	kWh

Processo	Fluxo	Materiais e combustíveis	Quantidade	Unidade
	Saída	Expedição	400,00	kg
Britagem Agregado graúdo	Entrada	Diesel moagem	0,00	litros
		Pedra	870,00	kg
		Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	0,00	litros
	Saída	Agregado graúdo	870,00	kg
Produção de concreto	Entrada	Insumo concreto	1020,68	kg
		CP-V-ARI-RS	400,00	kg
		Fíler	0,00	kg
		Agregado graúdo	870,00	kg
		Diesel Pá Carregadeira	0,41	litros
		Diesel - pá carregadeira	0,41	litros
	Saída	Concreto para distribuição	1,00	m ³
Transportes para a Central de Concreto	Entrada	CP-V-ARI-RS	400,00	kg
		Agregado graúdo	870,00	kg
		Fíler	0,00	kg
		Caminhão, frete, capacidade de carga 16-32 t (Brasil)	156,40	tkm
		Caminhão, frete, capacidade de carga 16-32 t (Brasil)	16,53	tkm
	Saída	Insumos do Concreto	1270,00	kg
Distribuição do concreto	Entrada	Concreto para distribuição	1,00	m ³
		Diesel Betoneira	3,35	litros
		Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	3,35	litros
		Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	0,00	litros
		Caminhão, frete, capacidade de carga 16-32 t (Brasil)	0,00	tkm
	Saída	Concreto na obra	1,00	m ³

Processos, fluxos e quantidades envolvidas na produção de 1 m³ de concreto de baixo carbono. Fonte: Planilha CIVIA - Concreto Baixo Carbono (Inter cement) Data: 10/09/2020.

Processo	Fluxo	Materiais e combustíveis	Quantidade	Unidade
Insumos da Farinha	Entrada	Argila	7,66	kg
		Minério de Ferro	2,35	kg
		Terra Contaminada	1,39	kg
	Saída	Insumos da Farinha	11,40	kg
Blend de combustíveis	Entrada	Óleo Combustível	0,07	litros
		Blend industrial sólido	3,45	kg
		Resíduo oleoso	0,74	kg
		Pneu inteiro	2,75	kg
		Carvão	0,00	kg
		Moinha de Carvão	3,63	kg
	Saída	Blend de combustíveis	10,65	kg
Insumos do Cimento	Entrada	Fosfogesso (gesso sulfato)	1,47	kg
		Gesso mineral	14,42	kg
		Aditivo	0,11	kg
		Escória	16,54	kg
	Saída	Insumos do Cimento	32,55	kg
Insumos do Concreto	Entrada	Aditivo	4,37	kg
		Agregado miúdo	829,00	kg
		Água	160,00	kg
		Agregado graúdo	949,00	kg
	Saída	Insumos do Concreto	1942,37	kg
Obtenção de coque	Entrada	Coque de petróleo (produção Brasil)	9,28	kg
	Saída	Coque moído	9,28	kg
Diesel Pá Carregadeira	Entrada	Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	0,41	litros
	Saída	Diesel pá carregadeira	0,41	litros
Diesel Betoneira	Entrada	Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	3,35	litros
	Saída	Diesel betoneira	3,35	litros
Diesel Bomba	Entrada	Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	0,00	litros
	Saída	Diesel Bomba	0,00	litros
Diesel Moagem Agregado	Entrada	Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	0,00	litros
	Saída	Diesel moagem agregado	0,00	litros
Diesel Moagem Cimento	Entrada	Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	0,25	litros
	Saída	Diesel moagem cimento	0,25	litros
	Entrada	Eletricidade	0,40	kWh

Processo	Fluxo	Materiais e combustíveis	Quantidade	Unidade
Britagem Calcário Clínquer		Calcário	220,13	kg
	Saída	Calcário britado - clínquer	220,13	kg
Britagem Calcário Cimento	Entrada	Eletricidade	0,40	kWh
	Saída	Calcário britado Cimento	8,97	kg
Moagem de Farinha	Entrada	Insumos da Farinha	11,40	kg
		Calcário britado - clínquer	220,13	kg
		Eletricidade	3,26	kWh
	Saída	Farinha	231,53	kg
Moagem de Coque	Entrada	Eletricidade	0,33	kwh
	Saída	Coque moído	9,28	kg
Calcinação	Entrada	Farinha	231,53	kg
		Blend de combustíveis	10,65	kg
		Coque moído	9,28	kg
		Eletricidade	5,67	kWh
		Óleo Combustível	0,07	litros
		Blend industrial sólido	52,96	MJ
		Coque	9,28	kg
		Resíduo oleoso	12,47	MJ
		Pneu inteiro	2,75	kg
		Carvão	0,00	kg
		Moinha de Carvão	3,63	kg
		Outros	0,00	MJ
		Refratário - Forno	0,10	kg
	Descarbonatação (Dióxido de Carbono)	78,53	kg	
Saída	Clínquer	149,58	kg	
Moagem de Cimento	Entrada	Clínquer	149,58	kg
		Calcário britado Cimento	8,97	kg
		Insumo do Cimento	32,55	kg
		Diesel do Cimento	0,25	litros
		Eletricidade	12,42	KWh
		Aço Puro (produção Brasil)	0,01	kg
	Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	0,25	litros	
Saída	CP-V-ARI-RS	191,00	kg	
Expedição	Entrada	CP-II-E-40	0,00	kg
		Eletricidade	0,23	kWh
	Saída	Expedição	191,00	kg
Produção de Fíler	Entrada	Moagem	10,45	kWh
		Britagem	0,38	kWh
		Calcário	209,00	kg

Processo	Fluxo	Materiais e combustíveis	Quantidade	Unidade
	Saída	Fíler	209,00	kg

Britagem Agregado graúdo	Entrada	Diesel moagem	0,00	litros
		Pedra	949,00	kg
		Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)	0,00	litros
	Saída	Agregado graúdo	949,00	kg
Produção de concreto	Entrada	Insumo concreto	993,37	kg
		CP-II-E-40	0,00	kg
		Fíler	209,00	kg
		Agregado graúdo	949,00	kg
		Diesel Pá Carregadeira	0,41	litros
		Diesel - pá carregadeira	0,41	litros
	Saída	Concreto para distribuição	1,00	m3
Transportes para a Central de Concreto	Entrada	CP-V-ARI-RS	191,00	kg
		Agregado graúdo	949,00	kg
		Fíler	209,00	kg
		Caminhão, frete, capacidade de carga 16-32 t (Brasil)	74,68	tkm
		Caminhão, frete, capacidade de carga 16-32 t (Brasil)	18,03	tkm
		Caminhão, frete, capacidade de carga 16-32 t (Brasil)	10,45	tkm
	Saída	Insumos do Concreto	1140,00	kg
	Distribuição do concreto	Entrada	Concreto para distribuição	1,00
Diesel Betoneira			3,35	litros
Óleo diesel comercial, 2014 (produção Brasil)			3,35	litros
Saída		Concreto na obra	1,00	M³

Processos, fluxos e quantidades envolvidas na produção de 1 tonelada de vergalhões de aço CA50. Fonte: Declaração Ambiental de Produto (DAP) ArcelorMittal Brasil – Aço CA50.

Processos	Impacto	Quantidade	Unidade
Matéria prima, transporte e fabricação	Energia primária renovável	2420,00	MJ
	Energia primária não renovável	5710,00	MJ
	Resíduos perigosos	0,00	kg
	Resíduos não perigosos	5,00	kg
	Resíduos radioativos	0,00	kg
	Água	15,00	m ³
	Mudanças climáticas	786,00	kg CO ₂ -eq
Processamento de resíduos	Energia primária renovável	20,00	MJ
	Energia primária não renovável	44,00	MJ
	Resíduos perigosos	0,00	kg
	Resíduos não perigosos	150,00	kg
	Resíduos radioativos	0,00	kg
	Água	0,00	m ³
	Mudanças climáticas	3,66	kg CO ₂ -eq