

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/144

# Análise Comparativa de Paredes de Contenção para Estruturas de Garagem Subterrânea

Rui Matos

Engenheiro de Investigação Sénior, ArcelorMittal Global R&D, Esch-sur-Alzette, Luxembourg, rui.matos@arcelormittal.com

José Matias de Paula Filho

Engenheiro de Investigação Sénior, ArcelorMittal Global R&D, Esch-sur-Alzette, Luxembourg, jose.matias-de-paula@arcelormittal.com

Mariana Rosas Grandezzi Guerrero

Engenheira de Projetos, ArcelorMittal Projects, São Paulo/SP, Brasil, mariana.grandezzi@arcelormittal.com.br

João Martins

Diretor Técnico, ArcelorMittal Sheet Piling, Esch-sur-Alzette, Luxembourg, joao.martins@arcelormittal.com

Marcos Octavio Carvalho Magri

Gerente Geral, ArcelorMittal Projects, Belo Horizonte/MG, Brasil, marcos.magri@arcelormittal.com.br

**RESUMO:** Estruturas de garagem subterrânea tem aumentado significativamente nos últimos anos nas cidades em constante expansão, como forma de otimizar o uso do solo disponível. Por isso, a definição e seleção da parede de contenção é de vital importância para o desempenho da solução final. O estudo apresentado neste documento se concentra nas particularidades do mercado brasileiro e tem como objetivo comparar as duas soluções mais representativas desse mercado. Efetuou-se em primeiro lugar, uma análise/comparação de custos de ambas as soluções, levando também em consideração o efeito dos diferentes tempos de execução em uma análise de fluxo de caixa proposta, a fim de identificar e ressaltar os principais benefícios das paredes de estaca prancha. No entanto, os benefícios da solução de estaca prancha são ainda mais evidenciados pela análise ambiental de ciclo de vida proposta. Em 2020, o setor da construção civil foi responsável por 37% das emissões globais de CO<sub>2</sub>e. Considerando a mudança de orientação do mercado por utilização de produtos com baixas emissões de carbono, é apresentada uma análise do ciclo de vida de ambas as soluções, assumindo uma vida útil de 60 anos e são analisadas diferentes fases, desde a produção até o fim da vida, incluindo os benefícios futuros (módulo D).

**PALAVRAS-CHAVE:** Contenções, Estaca prancha, Parede diafragma, Análise de custos, Análise ambiental

## 1 INTRODUÇÃO

O constante crescimento das cidades, e conseqüentemente da densidade populacional, um pouco por todo o mundo, tem levado a uma necessidade acrescida de utilização inteligente e otimizada do espaço disponível. Por esta razão, a adoção de estruturas de garagem subterrâneas tem aumentado significativamente.

Tendo em conta o aumento da adoção de estruturas de garagem subterrâneas, a seleção da melhor solução de contenção é um ponto fundamental na conceção estrutural do sistema.

Neste estudo, focado nas características e requisitos do mercado brasileiro, foram comparadas as duas soluções mais comumente aplicadas neste tipo de estruturas (paredes diafragma e paredes de estaca prancha).

No caso de estudo adotado, foi selecionada uma localização no centro da cidade do Rio de Janeiro (Figura 1) com uma elevada densidade ocupação do terreno por terrenos vizinhos e, como tal, é fundamental ter especial atenção aos assentamentos provocados pela deformação excessiva da parede.

O dimensionamento apresentado neste estudo foi executado de forma independente e foi levado a cabo pelo gabinete de cálculo ABS.

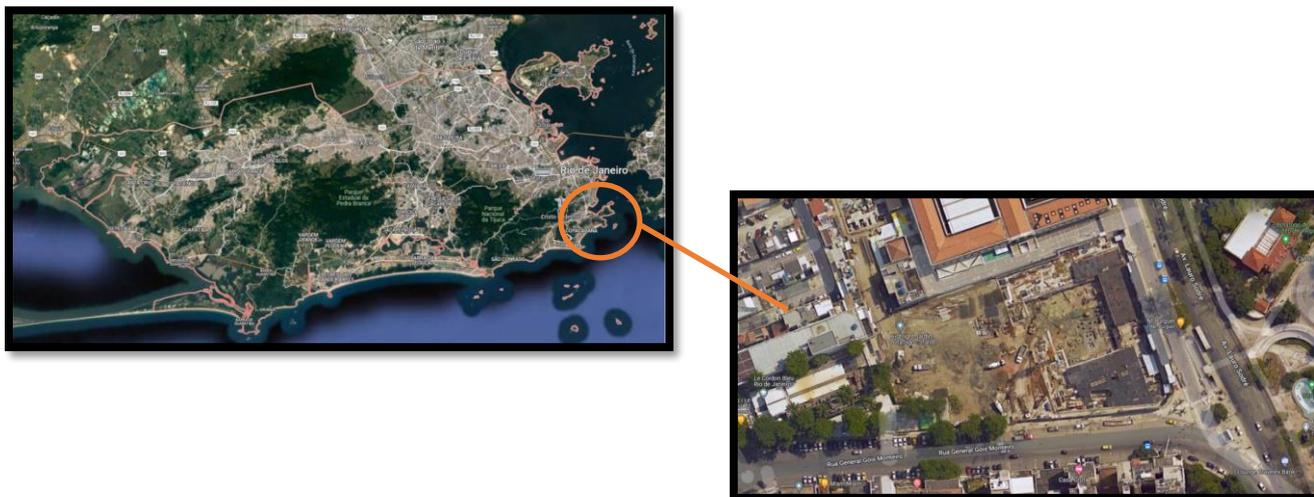


Figura 1: Área de implementação (Rio de Janeiro – Brasil)

Neste caso de estudo, foi considerada uma dimensão em planta de 50x50m e 7.5m de escavação para a estrutura de garagem subterrânea, tal como ilustrado na Figura 2.

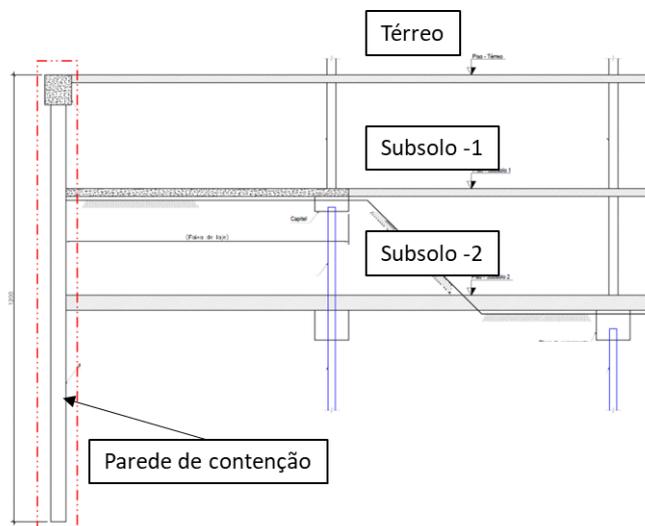


Figura 2: Seção transversal da garagem com dois parques subterrâneos

## 2 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

No dimensionamento das soluções, foram adotadas algumas simplificações que serão abordadas neste capítulo. Foi assumido que as condições internas das paredes foram mantidas constantes (lajes, estrutura interna, escoramentos...) e como tal não foram consideradas nesta comparação. Foi ainda considerado que as paredes não suportavam nenhuma carga axial vertical e eram apenas submetidas a flexão.

Foi assumida uma sobrecarga no terreno adjacente de 20kPa e foi considerado que a deformação máxima admissível na parede é de 1% do comprimento livre, devido à elevada densidade de edifícios na vizinhança da parede.

No caso de estudo em questão, o cálculo dos esforços e deslocamentos foi feito com recurso ao software Plaxis #, utilizando o modelo material de Hardening-Soil (HS). As etapas de cálculo assumidas foram as seguintes:

- Condição de solo natural
- Execução da parede
- Rebaixamento do lençol freático
- Escavação dos primeiros 3 metros (em 3 passos)
- Instalação e ativação da primeira escora
- Escavação de 4.5 metros (em 5 passos) – com berma de 6m de largura junto a prancha e taludes com inclinação de 1.5H x 1V
- Execução da laje do primeiro subsolo
- Escavação da berma restante (4.5 metros em 5 passos)
- Execução da laje de fundo

As estacas pranchas foram dimensionadas com perfis U e foi considerado um tempo de vida útil de 50 anos com uma corrosão assumida de 2.75mm (1mm na frente e 1.75mm na traseira da parede). Nestas condições foi obtida uma seção de 12m com AU14 em S430GP com um fator de utilização de 0.79.

No caso da parede de diafragma, a solução final é também de 12m de comprimento com 40cm de espessura em concreto C30/37. O fator de utilização desta parede é de 0.88, o que faz com que a comparação com a parede de estaca prancha proposta seja razoável devido à semelhança de ambos os fatores de utilização.

### 3 CUSTOS E PLANEAMENTO

Como consequência dos resultados do dimensionamento de ambas as soluções do capítulo 2, ambas as soluções foram comparadas do ponto de vista de custo e do ponto de vista do planeamento.

De acordo com os mapas de quantidades definidos, o custo total da solução de estacas pranchas foi de R\$4461487.25 enquanto o valor da solução de parede diafragma foi de R\$3832828.10, o que representa um acréscimo de 16% no custo da parede de estacas pranchas quando comparada com a parede de concreto. A distribuição dos custos das atividades na execução de cada parede é apresentada na Figura 3.

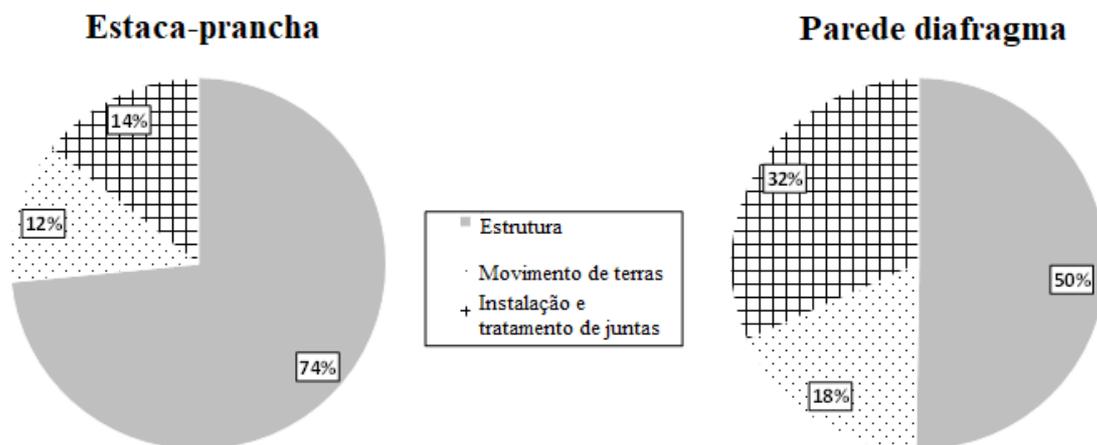


Figura 3: Distribuição de custos

Vale no entanto ressaltar que, de acordo com a análise de planeamento de cada solução, a parede de estaca prancha tem uma duração de construção de 28 dias (4 semanas) enquanto a solução de concreto apresenta uma duração de 128 dias (18 semanas) (78% mais longa que a de estacas pranchas), de acordo com a descrição apresentada na Tabela 1. Devido a este fator, os valores de custo real de ambas as soluções deve ser revisto e para tal foi proposta uma metodologia de fluxo de caixa.

Nesta análise considerou-se um custo de vaga de R\$35 por dia, 167 lugares disponíveis na garagem, uma taxa de juro anual de 8% e uma ocupação do parque de 100%. Ainda mais, é considerado que o empréstimo é recebido no início da construção e que o pagamento é iniciado no final da construção da solução mais longa (concreto)

A estimativa dos juros foi feita semanalmente e foi ainda estimado o valor de ganhos com base na ocupação diária de 100% da garagem. Desta forma, o valor dos juros deverá ser somado ao valor do custo

inicial da obra (dívida) enquanto o valor total de ganhos deve ser subtraído a este (lucro). O resultado desta análise está presente na Tabela 2.

Tabela 1. Planejamento das paredes

	Produtividade	Estaca prancha	Diafragma
Cravação de estaca prancha	200m/dia	11.88	-
Escavação para parede diafragma	24m/dia	-	100
Mobilização de equipamento vibro-prensagem	2 dias	2	-
Mobilização de equipamento clamshell	14 dias	-	14
Cura concreto	14 dias	14	14
<b>Total (dias)</b>	-	<b>28</b>	<b>128</b>

Tabela 2. Impacto da análise de fluxo de caixa no custo das paredes

	Estaca prancha	Diafragma
Duração (semanas)	4	18
Impacto no caminho crítico (semanas)	0	14
Investimento total inicial (R\$)	4461487	3832828
Juro total (R\$)	125510	107825
Ganho total (R\$)	584033	0
Aumento do valor do investimento inicial (R\$)	-458523	107825
<b>Investimento total – fluxo de caixa (R\$)</b>	<b>4002964</b>	<b>3940653</b>

Conforme análise da Tabela 1, é possível confirmar que o valor final de investimento incluindo a análise proposta de fluxo de caixa levando em conta os diferentes tempos de execução das soluções, é bastante semelhante levando a que a solução de estacas pranchas se torne numa solução viável não só pelo custo final mas também pelo fato de ser uma solução menos disruptiva no fluxo de tráfego e de pessoas (bastante relevante numa aplicação no centro de uma cidade) e de ser uma solução que gera menos resíduos aquando da execução.

## 4 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

### 4.1 Conceito

Uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser aplicada para avaliar as emissões de carbono das construções: é uma metodologia científica e padronizada, para quantificar e relatar os impactos ambientais. Entre diversos outros propósitos, é utilizada para medir e fornecer insights para reduzir as emissões de carbono das construções ao longo de seus ciclos de vida: antes do uso da construção, durante o uso da construção e no final da vida útil (EOL) da construção.

Para melhorar a eficácia do processo, a ACV deve, tanto quanto possível, ser realizada na fase inicial de um projeto de construção. Nesse contexto, as emissões de materiais e produtos devem ser abordadas pelas ACV para garantir que as construções em construção hoje sejam otimizadas para soluções de baixa emissão de carbono em todo o seu ciclo de vida. Isso envolve avaliar cada escolha de projeto usando uma abordagem de ciclo de vida completo para minimizar os impactos de carbono iniciais (por exemplo, materiais de baixa emissão de carbono) e tomar medidas para evitar futuras emissões durante o fim de vida da construção.

De acordo com a EN 17472, uma ACV é realizada em quatro fases distintas. As fases frequentemente são interdependentes, pois os resultados de uma fase informarão como outras fases são concluídas.

- Objetivo e escopo;
- Inventário do ciclo de vida;
- Avaliação de impacto do ciclo de vida;
- Resultados e interpretação.

## 4.2 Objetivo e escopo

O objetivo da presente ACV é quantificar o desempenho ambiental de opções estruturais equivalentes, compostas por diferentes materiais, das paredes de contenção que cercam o estacionamento subterrâneo de um prédio comercial localizado no Rio de Janeiro, Brasil. Este estudo de caso abordará especificamente as paredes de contenção do estacionamento subterrâneo no edifício comercial. Outros componentes do edifício comercial e seus níveis subterrâneos não estão incluídos no objeto de avaliação.

### 4.1.1 Unidade Funcional (UF)

A unidade funcional para esta ACV abrange um total de 200 metros de comprimento de uma parede de contenção com uma profundidade máxima de escavação de 7,5 metros, situada em um estacionamento subterrâneo de um prédio comercial localizado no Rio de Janeiro, na região de Botafogo, com uma vida útil de 60 anos. O edifício tem formato quadrado medindo 50 m por 50 m e dois níveis abaixo do solo (Figura 1)

### 4.1.2 Fronteiras do sistema da ACV

A Norma Internacional ISO 21930 e a Norma Europeia EN 15804 estabelecem um modelo comum de ciclo de vida para edifícios e obras de construção. O modelo de ciclo de vida inclui definições modulares para as etapas do ciclo de vida, permitindo que cada etapa seja comparada isoladamente com outros projetos.

Dependendo do propósito da ACV, algumas etapas do ciclo de vida podem ser omitidas ou substituídas por um cenário na ausência de informações detalhadas. A presente ACV considera as seguintes etapas do ciclo de vida:

- A1-A3, Estágio do produto;
- A4-A5, Estágio do processo de construção;
- B3, Estágio de uso;
- C2-C4, Estágio de fim de vida;
- D, Benefícios e cargas além do limite do sistema.

A Figura 4 destaca em verde todas as etapas do ciclo de vida incluídas na ACV.

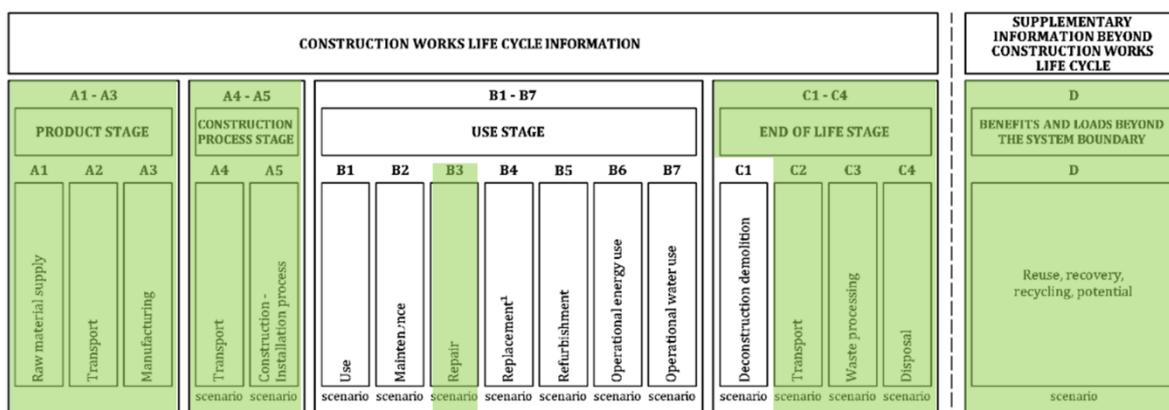


Figura 3: Etapas do ciclo de vida considerada na ACV

Diferentes cenários de fim de vida foram atribuídos às paredes de contenção de estacas pranchas de aço e de diafragma de concreto armado. Foi assumido que a parede de estacas pranchas de aço será recuperada e reciclada ao final de sua vida útil (60 anos). Por outro lado, foi assumido que a parede de diafragma de concreto armado permanecerá no local ao final de sua vida útil.

## 4.3 Inventário do ciclo de vida

As declarações ambientais de produto (DAPs) oferecem insights quantificados sobre os impactos ambientais dos produtos. De acordo com a EN 15804:2012+A1:2013, foram utilizadas diversas DAPs como base de dados ambiental dessa ACV. Além disso, o banco de dados ambiental foi enriquecido pela integração de dados internamente verificados fornecidos pelo software comercial One Click LCA.

#### 4.4 Avaliação de impacto do ciclo de vida

A avaliação de impacto do ciclo de vida é focada no potencial de aquecimento global (GWP) como indicador designado para quantificar o impacto ambiental. Os cálculos dos valores de GWP dentro de cada módulo do ciclo de vida são derivados por meio de uma abordagem de cálculo de matriz, conforme ilustrado na Figura 4.

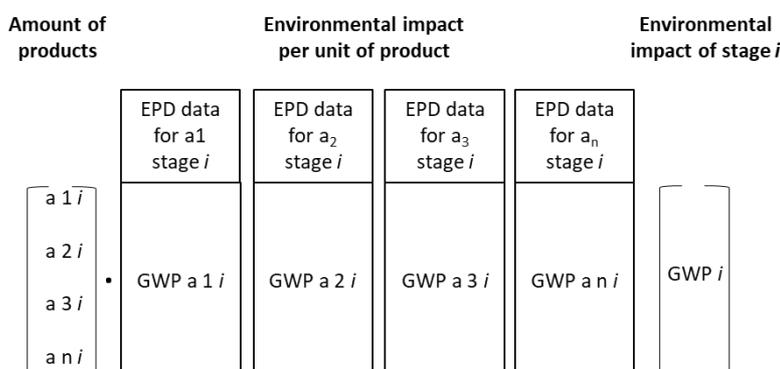


Figura 4: Princípio do cálculo matricial dos impactos ambientais para o módulo “i” do ciclo de vida da construção (para  $i = [A1-A3, A4, A5, B4, C2, C3, C4]$  e  $[D]$ )

#### 4.5 Resultados e interpretação

A Figura 5 compara o impacto ambiental da parede de diafragma de concreto armado e da parede de estacas pranchas de aço em termos de GWP. Esta figura destaca a intensidade das emissões em cada etapa do ciclo de vida da construção.

Notavelmente, o estágio do produto A1-A3 emerge como a fase mais influente, seguida pelo estágio de construção (A5) e pelo estágio de transporte (A4).

Quando comparada à parede de diafragma de concreto armado, a parede de estacas pranchas de aço:

- Reduziu o GWP geral em 48%;
- Reduziu o GWP relacionado à produção de materiais (módulo A1-A3) em 60%;
- Reduziu o GWP relacionado à instalação de elementos estruturais e ao desperdício de materiais durante a construção (módulo A5) em 32%;
- Aumentou o GWP relacionado ao transporte (módulo A4) em 80%.

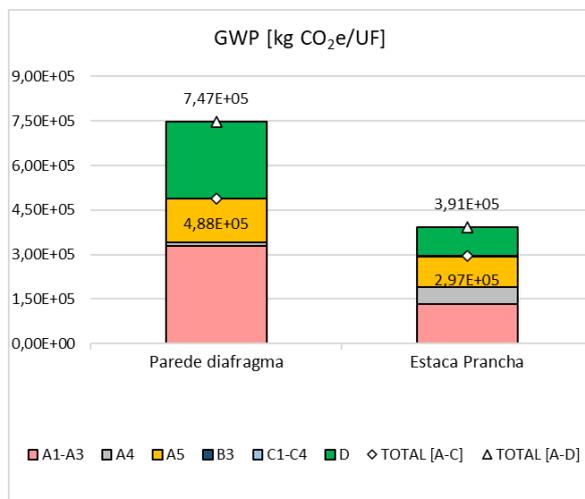


Figura 5: Comparação de GWP: parede diafragma vs. estaca prancha.

## 5 CONCLUSÕES

No estudo apresentado, mostra-se a comparação entre soluções de contenção mais comumente disponíveis no mercado Brasileiro para estruturas de garagem subterrâneas (estacas pranchas e paredes diafragma). A comparação foi feita em termos de custo, duração e impactos ambientais. As soluções apresentadas apresentam um grau de otimização semelhante que legitima a comparação.

Em termos de custos absolutos de construção, a comparação mostra que a parede de estaca prancha é cerca de 16% mais cara que a solução de concreto. No entanto, ficou também comprovado que a solução de aço é significativamente mais rápida de instalar (cerca de 78% mais rápida).

Recorrendo a uma análise proposta de fluxo de caixa para levar em conta os efeitos do tempo de instalação, foram determinados os impactos quer dos juros quer da receita gerada e concluiu-se que ambas as soluções apresentam um custo final semelhante (estacas pranchas cerca de 2% mais caras que a parede diafragma).

O estudo oferece também insights valiosos sobre os impactos ambientais de duas soluções equivalentes de paredes de contenção para estacionamentos subterrâneos: estacas pranchas de aço e paredes de diafragma de concreto armado. Os resultados de GWP, conforme ilustrado na Figura 6, proporcionam uma perspectiva clara sobre as etapas do ciclo de vida que impactam significativamente a pegada de carbono de cada solução.

No contexto da parede de estacas pranchas de aço, o estágio do produto (A1-A3), transporte (A4) e construção (A5) são cruciais, pois refletem a maioria das emissões. Dinâmicas semelhantes se aplicam à parede de diafragma de concreto armado em termos do estágio de produção (A1-A3) e estágio de construção (A5). No entanto, ao contrário da parede de estacas pranchas de aço, o estágio de transporte (A4) mostra uma contribuição menor, pois os materiais e produtos são obtidos localmente no Brasil.

No geral, a alternativa de estacas pranchas de aço reduziu o GWP em 48% em comparação com a alternativa de parede de diafragma de concreto armado. Vários fatores contribuíram para essa redução, tais como:

- O uso de estacas pranchas de baixa emissão de carbono: EcoSheetPile™ Plus produzidas a partir de quase 100% de aço reciclado com fonte de eletricidade 100% renovável, reduzindo o GWP do estágio de produção A1-A3 em 60%;
- Solução mais leve reduzindo o GWP para instalação na construção e menor desperdício de materiais no canteiro de obras (A5) em 32%.

Levando em conta outros benefícios não analisados nesta comparação (solução menos disruptiva no fluxo de tráfego e de pessoas (bastante relevante numa aplicação no centro de uma cidade) e que gera menos resíduos aquando da execução), a solução de estacas pranchas apresenta-se como uma solução com grande potencial para aplicação de estruturas de contenção de garagens subterrâneas no mercado Brasileiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ArcelorMittal Brasil, “Hot-Rolled Coil,” Belo Horizonte, 2020. [Online]. Available: <https://epd-online.com/EmbeddedEpdList/Download?id=12677>
- ArcelorMittal Commercial RPS S.à.r.l., “EcoSheetPile™ Plus,” Esch-sur-Alzette, 2021. [Online]. Available: <https://epd-online.com/EmbeddedEpdList/Download?id=14633>
- ArcelorMittal Europe, “XCarb® Recycled and renewably produced Reinforcing steel in bars.” Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU), 2021. [Online]. Available: <https://epd-online.com/EmbeddedEpdList/Download/14755>
- B. Hauke, M. Kuhnhenne, M. Lawson, and M. Veljkovic, Sustainable Steel Buildings: A Practical Guide for Structures and Envelopes, First Edit., no. 2016. John Wiley & Sons, Ltd, 2016. [Online]. Available: [www.EngineeringBooksLibrary.com](http://www.EngineeringBooksLibrary.com)
- CEN, BS EN 15804:2012+A1:2013 - Standards Publication Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products, no. February. 2013, p. 70.
- CEN, EN 15804:2012+A2:2019 - Standards Publication Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products, no. October. 2019, p. 76.
- CEN, “EN 17472:2022 Sustainability of construction works - Sustainability assessment of civil engineering works - Calculation methods.,” p. 114, 2022.
- ISO, 14044: Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines,” International Organization for Standardization, vol. 14044. 2006.
- ISO 21930, “ISO 21930:2017 - Sustainability in buildings and civil engineering works - Core rules for environmental product declarations of construction products and services,” International Organization for Standardization, 2017. <https://www.iso.org/standard/61694.html>
- ISO-Chemie GmbH, “Sealing systems Sealing tapes made of polyurethane and polyethylene Environmental Product Declaration ( EPD ),” Aalen, 2022. [Online]. Available: <https://www.teccaworld.com/media/dqghd50s/epd-expanderande-drevband.pdf>
- One Click LCA Ltd., “World’s fastest Building Life Cycle Assessment software - One Click LCA.” [https://www.oneclicklca.com/?utm\\_source=google&utm\\_medium=paidsearch&utm\\_campaign=BE&utm\\_content=brand&gclid=Cj0KCQjwz8emBhDrARIsANNJjS5xS6kardEI7r8ISDoxIqOAGk5\\_Uh\\_UnRHc\\_KELDKlmoecSZrPLfCkaAqCwEALw\\_wcB](https://www.oneclicklca.com/?utm_source=google&utm_medium=paidsearch&utm_campaign=BE&utm_content=brand&gclid=Cj0KCQjwz8emBhDrARIsANNJjS5xS6kardEI7r8ISDoxIqOAGk5_Uh_UnRHc_KELDKlmoecSZrPLfCkaAqCwEALw_wcB) (accessed Aug. 08, 2023).
- Perlita Y Vermiculita, “ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION- Perlifoc HP (Gypsum),” Barcelona, 2021. [Online]. Available: <https://csosteniblev4.s3-eu-west-1.amazonaws.com/dapcons/DAPcons-100-019-PERLITA-ENG.pdf>
- Votorantim Cimentos S.A, “Environmental Product Declaration for Ready Mixed Concrete C30/37, XS2, S4,” São Paulo, 2023.
- Y. J. Chang et al., “Environmental and Social Life Cycle Assessment of welding technologies,” Procedia CIRP, vol. 26, pp. 293–298, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2014.07.084.