

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LUIZ PAULO VIEIRA DE ARAUJO JUNIOR

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM ESTRUTURAS DE SOLOS**  
**REFORÇADOS COM GEOSSINTÉTICOS**

São Carlos

2025

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM ESTRUTURAS DE SOLOS**  
**REFORÇADOS COM GEOSINTÉTICOS**

**LUIZ PAULO VIEIRA DE ARAUJO JUNIOR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Civil.

Orientação: Prof. Dr<sup>a</sup> Cristiane Bueno

São Carlos

2025

Araújo Júnior, Luiz Paulo Vieira de

Avaliação do ciclo de vida de estruturas de solos reforçados com geossintéticos / Luiz Paulo Vieira de Araújo Júnior -- 2025.  
145f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Cristiane Bueno

Banca Examinadora: Cristiane Bueno, Diogo Aparecido Lopes Silva, José Antonio Schiavon, Heraldo Nunes Pitanga, Paulo Cesar de Almeida Maia

Bibliografia

1. Geotecnia ambiental. 2. Avaliação do ciclo de vida. 3. Circularidade dos materiais. I. Araújo Júnior, Luiz Paulo Vieira de. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180

## **DEDICATÓRIA**

Ao meu filho, Mateus, à minha esposa, Naila, à minha mãe, Rosalina, e à minha irmã, Jéssica,  
dedico este trabalho, pois foi fruto de muito esforço.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela vida, pela saúde e pela oportunidade de estar concluindo este importante ciclo de minha carreira.

Agradeço ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv), bem como à Universidade Federal de São Carlos.

Agradeço à minha orientadora professora Dr<sup>a</sup> Cristiane Bueno por todo suporte, pela disponibilidade seja por e-mail ou por lives, pois apesar de iniciar esta pesquisa em um período de pandemia, sempre se mostrou solícita e prestativa.

Agradeço à minha família por toda ajuda necessária, agradeço à minha esposa por todo cuidado e carinho para comigo, por se mostrar compreensiva nos momentos em que eu tive que me ausentar para escrever texto e fazer as demais atividades pertinentes a este trabalho. Agradeço ao meu filho por tornar os meus dias mais leves e por me tornar uma pessoa melhor, mostrando que a vida vale a pena.

Agradeço à minha mãe por todas as intercessões e pelos momentos de incentivos. Também agradeço à minha irmã pela parceria me incentivando em vários momentos desafiadores.

Agradeço aos vários colegas com quem eu tive a oportunidade de conversar e trocar experiências.

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta tornaram possível a realização deste trabalho.

## RESUMO

Os geossintéticos são materiais versáteis e com grande potencial para a aplicação na construção civil, oferecendo vantagens como facilidade de execução, economia e benefícios ambientais. No entanto, apesar de suas várias qualidades, a maioria das pesquisas sobre geossintéticos se concentra na análise da viabilidade técnica ou em estudos experimentais. Embora o número de estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na Engenharia Civil esteja crescendo, ainda há lacunas no que diz respeito aos geossintéticos, em especial, aos Solos Reforçados com esses materiais. Geralmente, os trabalhos sobre a temática limitam-se à etapa de fabricação e execução, ignorando a análise completa do ciclo de vida. Tal escopo limitado ignora, por definição, os impactos ambientais de longo prazo, uma prática que, muitas vezes, decorre da dificuldade em obter dados sobre as demais etapas e da incerteza sobre o destino final dos materiais. Essa lacuna é agravada pela concentração de estudos em países da Europa e da América do Norte, desconsiderando as particularidades do contexto sul-americano. Essa abordagem resulta em uma ACV descontextualizada, pois cria uma visão distorcida do real desempenho ambiental e subestima soluções regionais eficientes, perpetuando uma dependência de métricas que não servem plenamente ao contexto local. Diante disso, esta pesquisa teve como objetivo analisar, com o auxílio da metodologia de ACV e da análise de circularidade dos materiais, estruturas de solos reforçados com geossintéticos e compará-las com uma estrutura tradicional, considerando que considerassem as particularidades do contexto sul-americano. A metodologia compreendeu a análise ambiental através da ACV completa das estruturas, avaliando os potenciais impactos de três estruturas: duas de solos reforçados com geossintéticos, com geogrelha e geotêxtil tecido; outra tradicional de gravidade em concreto, sendo todas analisadas pelo método ReCiPe. Adicionalmente, a circularidade dos materiais foi avaliada pelo Material Circularity Indicator (MCI) para os principais constituintes das três estruturas. Por fim, foram analisados cenários com a adição de materiais reciclados em substituição aos virgens e com o plantio de vegetação na face da estrutura. Os resultados mostraram que as estruturas de solos reforçados com geossintéticos apresentaram um menor impacto ambiental quando comparadas com a estrutura em concreto, com uma redução de pelo menos 80% na maioria das categorias analisadas. Observou-se também que o processo com os maiores potenciais de impacto foi o de execução, seguido pelo de fabricação para as três estruturas analisadas. A análise de circularidade, por sua vez, indicou que, à medida que foram acrescentados materiais reciclados, ambas as estruturas aumentaram o indicador MCI, com ganhos desse de até 250% para as estruturas de solos reforçados com geossintéticos e de 300% para a estrutura tradicional. Portanto, concluiu-se que as metodologias de ACV e análise de circularidade foram eficazes para avaliar qualitativa e quantitativamente os potenciais impactos das estruturas, demonstrando que as estruturas de solos reforçados com geossintéticos podem ser consideradas ambientalmente mais sustentáveis quando comparadas com uma estrutura tradicional em concreto.

**Palavras-chave:** Geotecnia Ambiental, Mudanças Climáticas, Sustentabilidade, Materiais de Contenção Alternativos, Circularidade dos Materiais.

## ABSTRACT

Geosynthetics are versatile materials with great potential for use in civil construction, offering advantages such as ease of use, cost-effectiveness, and environmental benefits. However, despite their many qualities, most research on geosynthetics focuses on technical feasibility analysis or experimental studies. Although the number of Life Cycle Assessment (LCA) studies in Civil Engineering is growing, there are still gaps regarding geosynthetics, particularly soils reinforced with these materials. Studies on the subject are generally limited to the manufacturing and construction stages, ignoring a complete life cycle analysis. This limited scope, by definition, ignores long-term environmental impacts, a practice that often stems from the difficulty in obtaining data on other stages and uncertainty about the final destination of the materials. This gap is exacerbated by the concentration of studies in European and North American countries, disregarding the particularities of the South American context. This approach results in a decontextualized LCA, creating a distorted view of actual environmental performance and underestimating efficient regional solutions, perpetuating a reliance on metrics that do not fully address the local context. Therefore, this research aimed to analyze, using LCA methodology and material circularity analysis, geosynthetic-reinforced soil structures and compare them with a traditional structure, considering the particularities of the South American context. The methodology included an environmental analysis through a complete LCA of the structures, evaluating the potential impacts of three structures: two geosynthetic-reinforced soil structures with geogrid and woven geotextile; and another traditional concrete gravity structure, all analyzed using the ReCiPe method. Additionally, material circularity was assessed using the Material Circularity Indicator (MCI) for the main constituents of the three structures. Finally, scenarios involving the addition of recycled materials to replace virgin materials and the planting of vegetation on the face of the structure were analyzed. The results showed that geosynthetic-reinforced soil structures had a lower environmental impact compared to concrete structures, with a reduction of at least 80% in most categories analyzed. It was also observed that the process with the greatest potential impact was the execution process, followed by the fabrication process for all three structures analyzed. The circularity analysis, in turn, indicated that, as recycled materials were added, both structures increased the MCI indicator, with gains of up to 250% for geosynthetic-reinforced soil structures and 300% for the traditional structure. Therefore, it was concluded that the LCA and circularity analysis methodologies were effective in qualitatively and quantitatively assessing the potential impacts of the structures, demonstrating that geosynthetic-reinforced soil structures can be considered environmentally more sustainable when compared to a traditional concrete structure.

**Keywords:** Environmental Geotechnics, Climate Change, Sustainability, Alternative Containment Materials, Circularity of Materials.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA.....	17
1.3 OBJETIVOS.....	20
1.3.1 Objetivo Geral.....	20
1.3.2 Objetivos Específicos.....	20
1.4 HIPÓTESE.....	20
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>22</b>
2.1 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	21
2.2 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA E ANÁLISE DE CIRCULARIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	26
2.2.1 Fases de uma Avaliação de Ciclo de Vida.....	26
2.2.1.1 Definição de objetivo e escopo.....	27
2.2.1.2. Análise de Inventário do Ciclo de Vida.....	29
2.2.1.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV).....	30
2.2.1.4 Interpretação.....	31
2.2.2 Economia Circular (EC) na Construção Civil.....	32
2.2.2.1 Indicadores de Circularidade de Materiais.....	38
2.2.3 Principais Conceitos sobre Geossintéticos.....	45
2.2.4 Geossintéticos para Prevenção de Deslizamentos de Solos e Estabilização de Taludes.....	48
2.2.5 Estruturas de Solos Reforçados.....	50

2.2.6 Aplicação de Avaliação de Ciclo de Vida em Estruturas de Solos Reforçados com Geossintéticos: Revisão Sistemática da Literatura.....	53
2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O REFERENCIAL TEÓRICO.....	59
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>61</b>
3.1 ETAPAS DA PESQUISA.....	61
3.1.1. Apresentação das estruturas que foi aplicadas a ACV.....	63
3.2 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO.....	64
3.2.1 Objetivo da pesquisa.....	64
3.2.2 Motivação para realização do estudo.....	64
3.2.3 Público-alvo.....	64
3.3 DEFINIÇÃO DE ESCOPO.....	65
3.3.1 Tipos de entregas e aplicações pretendidas.....	65
3.3.2 Função e unidade funcional.....	65
3.3.3 Fronteiras do sistema.....	68
3.3.4 Escopo Geográfico.....	69
3.3.5 Escopo Temporal.....	69
3.3.6 Escopo Tecnológico.....	70
3.4 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA.....	70
3.4.1 Fabricação dos materiais.....	71
3.4.2. Execução das estruturas.....	72
3.4.3. Manutenção das estruturas.....	73
3.4.4. Destino final.....	74
3.4.5. Distância de Transporte.....	74
3.5 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV).....	75
3.6 INTERPRETAÇÃO.....	76
3.7 ANÁLISE DE CIRCULARIDADE DOS PRINCIPAIS CONSTITUINTES DAS ESTRUTURAS.....	77
3.8 ANÁLISES DOS CENÁRIOS PROPOSTOS.....	77
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>79</b>
4.1. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....	79
4.1.1. Potenciais de Impactos.....	79
4.1.2. MCI.....	89

4.2 ANÁLISE DE CENÁRIOS.....	90
4.2.1. Potenciais de Impactos.....	90
4.2.2. MCI com acréscimos de materiais reciclados.....	93
4.2.3. MCI comparado com CTI.....	94
4.2.4. Potenciais de Impactos variando as alturas.....	97
4.3 Considerações sobre a seção de resultados e discussão.....	100
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>101</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>103</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>104</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>119</b>
ANEXOS A – PROCESSO DE ESCOLHA E SELEÇÃO DOS ARTIGOS.....	119
ANEXO B – ARTIGOS SELECIONADOS NA REVISÃO SISTEMÁTICA (REFERÊNCIAS).....	122
ANEXO C - DADOS CLIMATOLÓGICOS RELATIVOS AO ANO DE 2024.....	125
ANEXO D – DADOS PARA MODELAGEM POR ETAPA DAS ESTRUTURAS.....	126
ANEXO E – MEMORIAL DE CÁLCULO DA ESTRUTURA EM CONCRETO E DA ESTRUTURA DE SOLOS REFORÇADOS COM GEOSSINTÉTICO.....	128

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo para melhorar a circularidade dos materiais no setor da construção civil.....	34
Figura 2 - Metodologia do canteiro de obras circulares.....	36
Figura 3 - Tipos de geossintéticos.....	45
Figura 4 – Terra Armada.....	49
Figura 5 – Estrutura de solos reforçados com geossintéticos.....	49
Figura 6 – Estrutura de solos reforçados com geossintéticos com face em concreto.....	50
Figura 7 - Seção transversal típica de um muro de solo reforçado com geossintético com face em blocos de concreto.....	51
Figura 8 – Seção típica Estrutura de solo reforçado com cobertura vegetal na face.....	52
Figura 9 – Estrutura de solos reforçados com geossintéticos com incorporação de vegetação na face.....	52
Figura 10 - Distribuição temporal dos trabalhos.....	55
Figura 11 – Origem do país da instituição dos primeiros autores.....	56
Figura 12 - Revista onde artigos foram publicados.....	57
Figura 13 - Países que foram aplicados os estudos sobre o tema.....	58
Figura 14 - Obra onde os geossintéticos foram aplicados.....	59
Figura 15 - Geossintéticos utilizados.....	59
Figura 16 - Fluxograma das etapas das seções de metodologia.....	62
Figura 17 - Estrutura em concreto (Gravidade).....	67
Figura 18 - Estrutura em solo reforçado com geossintéticos.....	67
Figura 19 - Geossintéticos a serem analisados: a) Geogrelha; e b) Geotêxtil tecido.....	68
Figura 20 - Sistema do produto das estruturas de contenção de solos.....	68
Figura 21 - Matriz energética do Brasil.....	72
Figura 22 - Contribuição dos processos por categoria de impacto da Estrutura em Concreto.....	81

Figura 23 - Contribuição dos processos por categoria de impacto da Estrutura de Solos Reforçados com Geogrelha.....	82
Figura 24 - Contribuição dos processos por categoria de impacto da Estrutura de Solos Reforçados com Geotêxtil Tecido.....	83
Figura 25 - Contribuição relativa dos impactos para o processo de fabricação.....	86
Figura 27 - Contribuição relativa dos impactos para o processo de manutenção.....	87
Figura 28 - Contribuição relativa dos impactos para o processo de fim de vida.....	88
Figura 29 - Análise de cenários do processo execução das estruturas de: (a) Geogrelha; (b) Geotêxtil Tecido.....	91
Figura 30 - Análise de cenários do processo de manutenção das estruturas de: (a) Geogrelha; (b) Geotêxtil Tecido.....	92
Figura 31 - Análise de cenários do processo de Fim de vida das estruturas de: (a) Geogrelha; (b) Geotêxtil Tecido.....	93
Figura 32 - Análise de cenários do MCI.....	94
Figura 33 - Análise de cenários do CTI.....	95
Figura 34 – Quantidade de cimento em função das alturas das estruturas.....	97
Figura 35 – Quantidade ferro função em das alturas das estruturas.....	98
Figura 36 – Consumo de diesel em função em das alturas das estruturas.....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros empregados para o cálculo do MCI.....	38
Tabela 3 – Trabalhos de ACV em geossintéticos e estruturas de solos reforçadas.....	49
Tabela 3 - Fatores de Segurança.....	66
Tabela 4 - Prescrições dos geossintéticos utilizados nas estruturas.....	66
Tabela 5 - Categorias de impacto empregadas no estudo.....	75
Tabela 6 - Fatores de normalização.....	76
Tabela 7- Porcentuais de resíduos acrescidos para o cálculo do MCI e CTI para os materiais.....	79
Tabela 8 - Resultados não normalizados.....	79
Tabela 9 - Resultados normalizados.....	80

## LISTA DE ABREVIATURAS

(%) – Porcentagem

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRAINCC – Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

AT - Acidificação Terrestre

d - Distância

CTI - Circular Transition Indicators

DT – Distância de Transportes

EAD - Eutrofização de água doce

EC - Economia Circular

EM - Eutrofização Marinha

EMF – Ellen MacArthur Foundation

ERM - Escassez de Recursos Minerais

EPDM - Monômero de Etileno Propilenodieno

FCOT - Formação da Camada Ozônio Terrestre

F(X) – Fator de utilidade

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICV – Inventário de Ciclo de Vida

IGS - Associação Brasileira de Geossintéticos

ILCD - International Life Cycle e Data

ISO – International Organization for Standardization

LFI - Indicador de Fluxo Linear

MC - Mudanças Climáticas

MCI - Material Circularity Indicator

m - Massa

NBR – Norma Brasileira

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PAIC - Pesquisa Anual da Indústria da Construção

PE – Polietileno

PIB - Produto Interno Bruto

PP – Polipropileno

PVC - Cloreto de Polivinila

THNC - Toxicidade Humana não Carcerigênica

UNEP - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

V – Matéria-prima Virgens

W – Resíduos não-recuperáveis

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Ao longo das últimas décadas, a demanda por recursos naturais tem aumentado de forma significativa e, atualmente, a indústria da construção responde por uma parcela significativa dos recursos extraídos globalmente (Wanzala; Obokoh, 2024).

A crescente pressão da humanidade sobre os ecossistemas, que resulta em passivos ambientais, é impulsionada pelos padrões de produção e pelo estilo de vida contemporâneo baseados no consumo de recursos para construção, mobilidade e outros fatores (Laroche, 2023).

De acordo com Cheng *et al.* (20024), a exploração de recursos para a manutenção dos níveis de consumo exerce uma pressão crescente e destrutiva sobre os sistemas ecológicos dos quais toda a vida depende, tornando imperativo que as estratégias políticas de crescimento econômico integrem a eficiência de recursos e a sustentabilidade ambiental para promover a transição para uma economia mais sustentável.

Nesse sentido, Seol *et al.* (2021), destacam que a Engenharia Civil está na linha de frente para alcançar as metas do desenvolvimento sustentável, pois o setor pode transformar comunidades e proporcionar melhorias para a qualidade de vida das pessoas. Uma das soluções que podem ser adotadas é a aplicação de estruturas alternativas em relação às estruturas tradicionais, o que pode ser alcançado através da utilização de estruturas de solos reforçados com geossintéticos. Esses materiais podem ser importantes para o desenvolvimento sustentável porque, como observado por Bueno e Vilar (2015) podem substituir recursos de matéria-prima que, muitas vezes, são escassos, podem substituir projetos difíceis, usando solo e outros materiais, são, na maioria das vezes, mais competitivos em termos de custo em relação a soluções tradicionais, podem ter potenciais de impactos muito inferiores às soluções tradicionais.

Entretanto, apesar das vantagens ambientais e econômicas destacadas, tais benefícios e qualidades mencionadas não estão sendo observados para a mitigação dos impactos gerados pelas atividades de construção (Kaja; Goyal, 2023).

Portanto, para atingir as metas de sustentabilidade ambiental e responder a questões críticas como a escassez de recursos, o consumo de combustíveis fósseis e o consequente aumento alarmante das emissões de gases de efeito estufa, é necessário minimizar tanto os

fluxos de recursos advindos da natureza quanto as emissões para a água, o ar e o solo (Wang; Azam, 2024). Assim, a quantificação destes fluxos de maneira coerente e clara pode ser alcançada através da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma das metodologias mais comuns para quantificar o desempenho ambiental de processos e produtos, o que a torna fundamental para o desenvolvimento de processos sustentáveis (Dervishaj; Gudmundsson, 2024).

Esta metodologia estruturada, abrangente e internacionalmente padronizada quantifica e qualifica os potenciais impactos à saúde e ao meio ambiente de qualquer bem ou serviço, analisando de forma completa os recursos consumidos, o seu esgotamento e todas as emissões geradas (ILCD, 2010).

A análise da literatura existente mostra que, apesar do crescimento das pesquisas sobre ACV na área de Engenharia Civil nos últimos anos. No entanto ainda persistem lacunas importantes, sobretudo no que concerne à incorporação de especificidades regionais (Thapa *et al.*, 2023).

Essa carência é particularmente notória na análise de obras com geossintéticos, cuja avaliação por ACV ainda é incipiente, contrastando com o amplo emprego dessas tecnologias em pesquisas que avaliaram parâmetros técnicos, como aterros (King *et al.*, 2017), estruturas de contenção (Sadat *et al.*, 2018), estradas (Correia; Zornberg, 2018) e estruturas de linhas férreas (Satyal *et al.*, 2018)."

Embora os estudos anteriormente citados tenham muita importância para a área de engenharia civil, esses tendem a avaliar a eficiência mecânica e seu desempenho técnico de longo, deixando em segundo em plano as análises ambientais, demonstrando assim uma compreensão limitada de seus desempenhos ambientais.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Dentre os causadores de impactos ambientais, a indústria da construção tem sido uma das grandes contribuintes. De acordo com Feng (2022), os impactos ambientais relativos à construção civil têm recebido atenção significativa nas últimas décadas, pois consomem mais de 40% da energia mundial, liberam um terço do total de emissões gasosas e respondem por 30% dos resíduos globais de aterros sanitários.

Quando se analisa as principais iniciativas para a construção sustentável, verifica-se uma baixa demanda por aplicação em estruturas de contenção de solos com geossintéticos

(Ruiz *et al.*, 2017). Nota-se uma necessidade em difundir mais a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida na área da engenharia civil, em especial, na área de estruturas de solos reforçados com geossintéticos, demonstrando que, além dos requisitos de segurança e viabilidade técnica, que os requisitos de sustentabilidade deveriam ser melhor abordados. No entanto, um dos impasses é que não existe uma metodologia padrão, o que dificulta a sua aplicação nos diversos setores que integram a indústria da construção (Reis, 2020). O mesmo autor reforça que, a falta de padronização na definição de unidades funcionais, fronteiras do sistema e métodos de avaliação comprometem a comparabilidade dos resultados e dificulta a aplicação consistente da ACV na indústria da construção.

Nesse contexto, pode-se observar, por exemplo, que a maioria dos muros de contenção é construída com concreto ou aço, no entanto, observa-se que eles contribuem muito para as mudanças climáticas (Heerten, 2012). Assim, identifica-se que, para utilizar muros de contenção sustentáveis, é essencial para o setor buscar outras soluções, a exemplo de muros de contenção com geossintéticos, pois isso pode ser mais econômico e, principalmente, ambientalmente mais benéfico (Damians *et al.*, 2015). Essas soluções mais sustentáveis podem reduzir custos, diminuir emissões e economizar energia nas etapas de concepção e utilização da estrutura. Além disso, podem ser mais vantajosos quando houver necessidade de manutenção (Balasbaneh *et al.*, 2021).

Podem-se enumerar alguns pesquisadores que desenvolveram estudos para avaliar quais são os principais potenciais de impactos de estruturas de contenção como Yepes *et al.* (2015), Tait e Cheung (2016), Balasbaneh *et al.*, (2020), Villalba *et al.* (2010), Zastrow *et al.* (2017), Pons *et al.* (2018), Molina-Moreno *et al.* (2017), Giri e Reddy (2015), Frischknecht *et al.* (2013), Balasbaneh e Bin Marsono (2020), Damians *et al.* (2016).

Uma das principais lacunas observadas foi que os trabalhos, anteriormente descritos, se preocuparam em analisar, especialmente, estruturas de contenção em concreto, sendo estudadas, em algumas poucas situações, estruturas alternativas, em especial, os muros de solos de reforçados com geossintéticos. Além disso, esses estudos analisaram estruturas de solos reforçados com geossintéticos realizadas em países europeus e norte-americanos, faltando um estudo que pudesse retratar as características próximas aos do Brasil, em especial, à região de São Carlos - SP.

Além da análise de ACV, a Economia Circular (EC) emerge como uma ferramenta crucial para a construção sustentável (Tazi *et al.*, 2021). Ao promover a reutilização e

recuperação de materiais, a EC minimiza o desperdício e cria um sistema produtivo mais eficiente e regenerativo (Murray *et al.*, 2017).

A economia circular na construção busca minimizar os impactos ambientais ao longo da vida útil das edificações (Brändström; Saidani, 2022). Apesar da necessidade de um modelo econômico sustentável, ainda falta uma metodologia abrangente para avaliar a circularidade do setor (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

Nesse sentido, a ACV enfrenta desafios como a ausência de uma metodologia consolidada e a carência de dados. Uma de suas principais características é a subjetividade nos critérios de decisão, que, contudo, não deve ser vista apenas como uma falha. Essa subjetividade é, na verdade, um traço inerente à própria metodologia, decorrente da complexidade dos sistemas ambientais e das escolhas normativas que o método exige (Miranda, 2019).

A análise de circularidade pode ser mais eficaz quando realizada em conjunto com a ACV (Glogic *et al.*, 2022). Isso, por sua vez, pode apoiar as tomadas de decisões e estratégias relacionadas ao desempenho ambiental e orientar a busca por melhorias ambientais mais eficazes de produtos e procedimentos (Lam *et al.*, 2022).

Além da necessidade de uma pesquisa que pudesse retratar o contexto sul-americano com condições próximas às do Brasil. Até onde se sabe, não existe um estudo de análise de circularidade dos principais constituintes de estruturas de solos reforçados com geossintéticos, destacando, assim, o caráter inédito desta pesquisa.

A combinação de ACV e EC para projetos de Estruturas de Solos Reforçadas com geossintéticos pode contribuir para o desenvolvimento sustentável, tornando um ambiente mais correto para o setor da construção civil. Adicionalmente, esta presente pesquisa pode contribuir para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 9 (indústria, inovação e infraestrutura), o ODS 12 (consumo e produção responsáveis) e o ODS 13 (ação climática), promovendo uma oportunidade para refletir sobre maneiras de tornar a Engenharia Civil uma atividade ambientalmente mais eficiente (Pan, 2024). Portanto, este estudo pode contribuir para as tendências regionais e governamentais porque, em um país onde a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que são auxiliadas pela Lei nº 12.305 (Brasil, 2010) e pela NBR 17100-1 (ABNT,2023), precisa ser mais difundida (Deus *et al.*, 2015), este estudo pode incentivar práticas de construção sustentáveis com responsabilidade ambiental.

Portanto, é importante que as informações geradas por esta pesquisa sejam acessíveis aos profissionais da área e que este estudo possa alcançar engenheiros civis, arquitetos,

ambientalistas e demais profissionais interessados, em um estudo de aplicação comparativa que foi previsto para ser divulgado ao público, contribuindo com o preenchimento da lacuna dos potenciais impactos em estruturas de solo reforçado com geossintéticos em conjunto com a análise circularidade, de uma das estruturas mais comumente empregadas na área de geotecnia.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa foi analisar, com auxílio da metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), estruturas de solos reforçados que empregam geossintéticos e compará-las com estruturas tradicionais que utilizam concreto, com a análise de circularidade dos materiais, a fim de compreender se as estruturas mais circulares foram as que possuem menores potenciais impactos ambientais.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Verificar e analisar quais são os processos (etapas) que mais causam impactos ambientais ao longo do seu ciclo de vida, compreendendo desde a fabricação até a destinação final;
- b) Embasar o desenvolvimento de estudos de ACV em estruturas de solos reforçados e contribuir para promover suporte à tomada de decisão de projetistas e especialistas da área;
- c) Realizar análise de circularidade dos materiais por meio indicadores.

### 1.4 HIPÓTESE

A hipótese desta tese é que as estruturas de solo reforçado com geossintéticos podem apresentar menores potenciais impactos ambientais, quando comparadas com estruturas tradicionais em concreto armado, o que foi verificado através de uma Avaliação de Ciclo de Vida comparativa em conjunto com uma análise de circularidade dos principais constituintes das estruturas.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em **seis capítulos**. No **primeiro capítulo**, foram apresentadas a introdução e a justificativa referentes ao tema abordado. Adicionalmente, foram descritos o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

No **segundo capítulo**, abordou-se sobre a importância do setor da construção para a economia do Brasil e foram apresentados os conceitos sobre a Sustentabilidade na Engenharia Civil. Adicionalmente, foram descritas as definições sobre Avaliação de Ciclo de Vida, bem como, as principais definições sobre geossintéticos e Estruturas de Solos Reforçados com esses materiais. Nesse mesmo capítulo foram descritas as definições sobre Circularidade dos Materiais. Finalmente, foi apresentada a Revisão Sistemática da Literatura de Avaliação de Ciclo em Estruturas de Solos Reforçados com geossintéticos.

Posteriormente, no **terceiro capítulo**, foi apresentada a metodologia da pesquisa, descrevendo quais foram as Estruturas empregadas neste trabalho; em seguida, foi descrita a forma de coleta dos dados. Adicionalmente, foi descrita a avaliação de impacto das estruturas e as análises de circularidade. Por fim, foram descritos os cenários propostos para a análise de circularidade e para a incorporação da vegetação em substituição à face de concreto.

No **quarto capítulo**, por sua vez, foram descritos os resultados obtidos para a avaliação de impacto, comparando em qual das etapas do ciclo de vida, houve mais potencial, bem como, foram apresentados resultados dos impactos relativos. Adicionalmente, foram apresentados os resultados das análises de circularidade e dos cenários propostos. Também nesta mesma seção, foram apresentadas as discussões sobre o presente estudo, estabelecendo um comparativo com outros que pesquisaram sobre a mesma temática. Adicionalmente, foram descritas as possíveis lacunas para trabalhos futuros.

Por fim, no **quinto capítulo**, foram apresentadas as conclusões deste trabalho, destacando algumas de suas contribuições e um breve resumo dos principais resultados observados nesta presente pesquisa.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O setor da construção civil demonstrou notável resiliência em 2024, registrando uma expansão de 4,3% em seu PIB, sendo que o setor representa mais de 3% do PIB nacional, desempenho este que é superior ao da economia nacional (IBGE, 2025; ABRAIN, 2024). No que tange à empregabilidade, o setor foi responsável por 7,84 milhões de postos de trabalho e pela criação de 11% das novas vagas formais no país (CBIC, 2024). Adicionalmente, evidenciou-se um forte encadeamento produtivo, com o setor movimentando 97 outras atividades econômicas (CBIC, 2024).

Segundo Ribeirinho *et al.* (2020), a construção civil representa uma das maiores indústrias a nível nacional e global, com uma participação de 13% no PIB mundial. Em paralelo, diversos desafios e tendências, como a sustentabilidade, os custos, a falta de mão de obra qualificada, o surgimento de novos materiais e o avanço da industrialização e digitalização, estão remodelando o setor para atender às exigências da chamada quarta revolução industrial (Lund *et al.*, 2020; Ribeirinho *et al.*, 2020).

Em 2023, a indústria da construção contava com 165,8 mil empresas ativas, que geraram um valor total de R\$ 484,2 bilhões em obras e serviços. Dentro deste cenário, o segmento de serviços especializados representa uma profunda transformação estrutural, sendo o único a registrar crescimento na última década. Sua participação no valor total das obras saltou de 17,8% em 2014 para um recorde de 24,0% em 2023. Este setor, classificado na Divisão 43 da CNAE, abrange atividades essenciais como preparação de terrenos, fundações e acabamentos, evidenciando uma forte tendência de especialização (IBGE, 2025; CONCLA, 2024). Todas essas informações reforçam a importância do setor para a economia, valendo destaque para a área fundações e preparações de terreno.

No entanto, a importância do ramo da indústria da construção para a economia do Brasil, infelizmente, se reflete na dimensão de seu potencial de geração de impactos ambientais. O setor de materiais de construção é um dos maiores contribuintes para o consumo de recursos naturais, representando 39% do total de emissões antropogênicas (Dighade *et al.*, 2024).

Considerando a grandeza do setor de construção, tanto positiva quanto negativa, percebe-se que é necessário buscar por iniciativas focadas nas atividades construtivas que

possam contribuir significativamente para o desenvolvimento sustentável (Pedroso, 2015). Assim, torna-se necessário avaliar a quantificação do desempenho ambiental dos sistemas de construção a fim de comunicar seus potenciais aspectos e impactos ambientais. Apesar de ser um grande causador de impacto, o setor de construção representa um papel importante em termos do desenvolvimento sustentável de assentamentos humanos e, em virtude disso, em 1999, o CIB (International Council for Research and Innovation in Building and Construction) publicou o documento intitulado “Agenda 21 on Sustainable Construction” (CIB - 1999), contemplando medidas para redução de impactos através de alterações na forma como os edifícios são projetados, construídos e gerenciados ao longo do tempo (Gomes, 2003).

Segundo Martinetti (2015), o Setor da Construção Civil brasileiro é carente de informações quantitativas relativas aos seus processos, nos mais diversos órgãos que avaliam as perdas na construção. Contudo, a contribuição desses órgãos pouco auxilia para determinar se a Construção Civil, ou se seus processos construtivos estão adequados às questões ambientais (Martinetti, 2015). Uma metodologia eficaz que pode avaliar os potenciais impactos de um processo ou produto da construção civil é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

A metodologia de ACV pôde ser um instrumento de Sustentabilidade a partir do momento em que parte da sociedade necessitou, se inserir em estudos sobre os potenciais os impactos ambientais ocasionados pelos produtos e meios empregados na Construção Civil (Saade, 2017).

A metodologia teve seus primeiros desenvolvimentos a partir da década de 60, tendo como objetivo principal estabelecer um comparativo entre impactos de produtos, em especial, de materiais (Guiné *et al.*, 2011). Ainda segundo os mesmos autores, o período entre as décadas de 70 e 90 foi o de concepção da metodologia ACV e, neste período, os autores destacam que foram realizadas diferentes abordagens e distintas terminologias, obtendo assim resultados conflitantes, dificultando, por um curto período de tempo, a aplicação da metodologia ACV.

No Brasil e em diversos países, a discussão sobre sustentabilidade tem ganhado enfoque nas últimas décadas devido, principalmente, às mudanças climáticas globais que vêm ocorrendo. Com isso, vem sendo despertado o interesse, em especial, de pesquisadores em criar formas de diminuir esses impactos. No entanto, segundo Martinetti (2015), existem muitas divergências de conceitos e de aplicação referentes à sustentabilidade.

Na atualidade, existe um maior interesse em melhor definir e discutir a temática sobre sustentabilidade, e percebe-se que especialistas da área do mundo todo, têm buscado criar ferramentas para quantificar os impactos ambientais e, dentre as soluções aplicadas, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) tem obtido êxito, por ser uma metodologia muito eficiente para gestão ambiental de produtos e serviços, sendo esta uma solução que vem sendo discutida (Malik *et al.*, 2019).

Atualmente, de maneira a promover políticas globais de desenvolvimento sustentável, que permita garantir condições de habitabilidade no Planeta Terra, estabeleceram vários acordos, que são os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS (Morton *et al.*, 2019). Os ODS correspondem a 17 objetivos dentro de um acordo universal que busca abordar as evidências científicas de que o mundo precisa de uma abordagem mais sustentável em suas ações de desenvolvimento (ONU, 2015). Para Vanden Berge *et al.* (2015) o mundo avançou a caminho do desenvolvimento sustentável a partir do momento que, foram estabelecidos esses acordos universais.

Conforme a ONU (2015), os objetivos são resumidos em 17 áreas de impacto, que fornecem uma estrutura cientificamente sólida, politicamente aceitável e publicamente intuitiva. Segundo Salvia *et al.* (2019), proposto pela ONU, os ODS representam uma abordagem global para direcionar as nações em direção a um desenvolvimento equilibrado e sustentável, através de um conjunto de metas a serem atingidas até 2030.

Para Kroll *et al.* (2019), esses objetivos englobam diversos setores, como a eliminação da pobreza, o alcance à educação, a provisão de cuidados médicos de excelência, a promoção da equidade entre os gêneros, o fomento de energia sustentável e a proteção da diversidade biológica, entre várias outras áreas.

Já com relação à área da construção, essa exerce um papel de extrema importância no contexto do desenvolvimento sustentável, uma vez que é responsável por uma parcela substancial do consumo de recursos naturais e pelos gases que provocam as mudanças climáticas (Salimian *et al.*, 2023). Apesar disso, a indústria da construção também apresenta oportunidades consideráveis para impulsionar a sustentabilidade através da adoção de práticas construtivas mais sustentáveis. Isso inclui a incorporação de materiais renováveis e reciclados, a implementação de sistemas de energia provenientes de fontes renováveis, a busca pela eficiência energética e a redução tanto de resíduos quanto de emissões (Ahmed *et al.*, 2021).

Além do exposto, a criação de edificações e infraestruturas sustentáveis desempenham um papel relevante no aprimoramento da qualidade de vida das populações, ao

promover a saúde e o bem-estar, além de atenuar disparidades sociais (Ershadi *et al.*, 2021). Com base nesses motivos, incentivar a sustentabilidade na construção civil representa tanto um desafio quanto uma oportunidade que requer a atenção de todos os envolvidos no setor (Brandão *et al.*, 2021).

Um dos principais desafios reside na carência de conscientização e estímulos destinados a promover práticas sustentáveis entre os profissionais e as empresas que atuam nesse setor (Malik *et al.*, 2019). Soma-se a isso, a necessidade de acréscimo nos custos iniciais dos projetos, podendo resultar em resistência por parte de potenciais clientes e investidores. Além disso, surge um desafio adicional relacionado à ausência de regulamentação e supervisão eficazes, dificultando a aceitação dos padrões de sustentabilidade ao longo do processo construtivo (Giorgi *et al.*, 2022). Contudo, à medida que a conscientização em relação à relevância da sustentabilidade cresce e governos implementam políticas e incentivos, juntamente com a crescente demanda de clientes e investidores por abordagens sustentáveis, a pesquisa ganha importância, sendo seu papel de extrema importância na promoção da incorporação de práticas sustentáveis no setor, auxiliando na adoção efetiva e duradoura dessas práticas (Bertozzi, 2022).

Segundo Barbosa Júnior *et al.* (2023), no âmbito da construção civil, destaca-se a busca por metas importantes dos ODS. O ODS 7 objetiva assegurar a disponibilidade de energia acessível e limpa. O ODS 9 direciona os esforços para a criação de infraestruturas resilientes, inclusivas e sustentáveis. Os ODS 11 enfoca a promoção da sustentabilidade em áreas urbanas e comunidades. Os ODS 12 e 13 buscam promover atitudes sobre consumo responsável e sobre as ações climáticas, respectivamente. Para alcançar esses objetivos, a indústria da construção tem concentrado investimentos em soluções sustentáveis. Isso inclui a adoção de materiais de construção mais eficientes, a aplicação de técnicas construtivas voltadas à sustentabilidade, a integração de energias renováveis, a reutilização consciente de recursos hídricos e a concepção de projetos que dão prioridade ao transporte público e à mobilidade urbana, dentre outras iniciativas relevantes.

Especificamente com relação ao emprego de soluções alternativas que podem ser as estruturas de solos reforçados, especialmente as com geossintéticos, conforme destacam Morsy e Thakeb (2022), essas construções podem contribuir para alcançar os ODS. Ainda segundo Morsy e Thakeb (2022), existem várias vantagens quando se comparam o uso de muros em geossintéticos com relação aos outros tipos de muros de contenção convencionais,

sendo que as soluções alternativas contribuem para alcançar 10 dos 17 ODS propostos pela ONU.

O estudo de Morsy e Thakeb (2022), em questão, revelou um benefício de grande relevância derivado da incorporação do aterro como elemento principal da estrutura, em contraposição à utilização do concreto como elemento primordial das estruturas convencionais. Este resultado ressaltou a importância central do presente estudo como uma etapa essencial no caminho para se alcançar a sustentabilidade no contexto de estruturas de contenção de solo.

## 2.2 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA E ANÁLISE DE CIRCULARIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Apesar do crescente aumento de estudos relacionados à avaliação de ciclo de vida, na área de construção civil no Brasil, ainda existem lacunas a serem exploradas, salvo os campos que se referem a produtos do cimento e de telhas, nos quais são áreas bem mais pesquisadas pelos especialistas em ACVs, o que não impede que mais estudos sejam realizados nessas áreas (Pedroso, 2015). Mas, esses campos são situações excepcionais, dificultando, assim, a formação de um banco de dados nacional que represente a realidade do Brasil.

Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2025), a Avaliação de Ciclo de Vida é uma metodologia reconhecida para tomada de decisão e para escolha entre produtos ou sistemas que desempenham funções iguais. Além do mais, a metodologia de ACV pode identificar oportunidades para promover melhorias de produtos ou serviços ao longo de seu ciclo de vida; conceder melhores informações para os tomadores de decisão na indústria, em empresas públicas ou privadas; e fornecer indicadores ambientais de desempenho ambiental importantes.

### 2.2.1 Fases de Uma Avaliação de Ciclo De Vida

Com base na norma na NBR ISO 14040 (ABNT, 2025), definem-se quatro fases num estudo de ACV, que são:

- I - definição dos objetivos e do escopo;
- II - análise do inventário;
- III - avaliação de impactos; e

#### IV - interpretação dos resultados.

##### 2.2.1.1 Definição de Objetivo e Escopo

Conforme NBR ISO 14040 (ABNT, 2025), a definição do objetivo e escopo é a primeira etapa de uma avaliação de ciclo de vida, e é nesta etapa que muitas particularidades são definidas. O objetivo e o escopo de uma ACV devem ser claramente definidos e devem ser consistentes com a aplicação pretendida. Devido à natureza iterativa da ACV, o escopo pode ser refinado durante o estudo. Esta fase deve estar muito bem definida, devendo descrever e fazer referência a um estudo comparativo entre produtos ou fazer referência a um estudo descritivo de um determinado processo.

Ainda segundo a ABNT NBR 14040 (ABNT, 2025), uma definição inicial e clara do objetivo é essencial para a correta interpretação posterior dos resultados. Conforme destaca Saade (2017), esse processo envolve garantir, na maior medida possível, que os produtos do estudo de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)/ACV não sejam inadvertidos ou erroneamente usados ou interpretados para além do objetivo ou escopo inicial para o qual foi realizado.

De acordo com Kloppfer e Grahl (2014), a definição de objetivos é uma declaração feita pela organização que comissiona a ACV de maneira a fornecer uma explicação para as seguintes questões:

- Alcance da aplicação: qual o objetivo do estudo?
- Interesse de realização: por que a ACV está sendo conduzida?
- Grupo(s) alvo: para quem o estudo de ACV será conduzido?
- Publicações ou outros acessos para o público: o estudo pretende incluir declarações comparativas?

Para Saade (2017), a formulação das respostas às perguntas acima citadas, garante que a análise seja bem direcionada, evitando-se, com isso, resultados irrelevantes e um consumo desnecessário de tempo e de recursos.

Definido o objetivo de uma ACV, a ABNT NBR 14040 (ABNT, 2025) determina que sejam claramente descritos o escopo, composto pelos seguintes tópicos: o sistema de produtos a serem estudados e suas funções, as fronteiras do sistema do produto, a unidade funcional, procedimentos de alocação, a metodologia de avaliação de impactos utilizada e

quais impactos selecionados, requisitos de dados, pressupostos e limitações do estudo, tipo de análise crítica (se aplicável), tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2025), a importância da adequada definição do escopo reside na garantia de que a amplitude, a profundidade e o grau de detalhe do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender ao objetivo estabelecido. Deve ser estabelecido que o conteúdo mínimo do escopo de um estudo de ACV precisa referir-se às suas três dimensões: onde iniciar e parar o estudo do ciclo devido (extensão); quantos e quais subsistemas incluir (largura); e o nível de detalhes do estudo (profundidade).

O sistema de produto é um conjunto de operações que define todos os processos elementares que compõem o ciclo de vida de um produto ou serviço, para os quais são coletados os dados sobre as entradas e saídas de matéria e energia durante um estudo de ACV (Wiesner; Hauge, 2021)

Conforme NBR ISO 14044 (ABNT, 2014), a unidade funcional, é o desempenho a ser quantificado de um sistema de produto para ser utilizado como unidade de referência em um estudo de ACV. O objetivo de uma unidade funcional é o de proporcionar referências para que as entradas e saídas que estejam relacionadas. Essas referências são necessárias para assegurar a comparabilidade dos resultados.

Outro ponto a ser definido na fase de objetivo e escopo é a etapa referente às fronteiras do sistema. De acordo com a ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2014), o ciclo de vida de um produto é constituído por uma cadeia de processos, quer ao longo do ciclo de vida, quer na integração dos processos necessários às entradas e saídas do ciclo de vida.

A definição do objetivo também deve identificar o público-alvo do estudo, ou seja, para quem se pretende comunicar os resultados do estudo. Isso serve, entre outros aspectos, para ajudar a identificar as necessidades de revisão crítica e a forma e nível técnico adequados dos relatórios. Além disso, a definição do objetivo deve declarar, explicitamente, se o estudo de ACV inclui uma afirmação comparativa a ser divulgada ao público, sendo que essa comparação deve ser feita entre sistemas de produtos e não apenas com produtos ou serviços (ILCD HANDBOOK, 2010).

Para uma melhor qualidade dos dados, devem ser definidos os escopos tecnológicos, geográfico e temporal de uma ACV. O escopo tecnológico de um processo ou produto representam técnicas reais do estudo; o escopo geográfico de processo ou produto descreve os parâmetros sobre sua localização (local(is), região, país, etc.); o escopo temporal é representado por um conjunto de dados que deve ser determinado examinando as diferentes

idades dos principais dados contribuintes, ressaltando-se que o escopo temporal está vinculado com o escopo tecnológico, pois a tecnologia que era eficaz há anos, pode não ser a melhor técnica a ser aplicada hoje (ILCD HANDBOOK, 2010).

Para finalizar o tópico sobre definição de escopo, num estudo de ACV, ressalta-se a importância da qualidade dos dados para a avaliação da confiabilidade dos resultados e a sua adequada interpretação. Requisitos de qualidade dos dados estão relacionados a temas, como: precisão, completeza, representatividade, consistência, reprodutibilidade, fontes dos dados e incerteza da informação (NBR 14044, ABNT 2014).

#### 2.2.1.2. Análise de Inventário do Ciclo de Vida

A NBR ISO 14044 (ABNT, 2014), define análise de inventário de ciclo de vida como “uma fase da ACV que envolve a compilação e a quantificação de entradas e saídas associadas a um produto ao longo do seu ciclo de vida”. Nesta fase, podem ser incluídos quais recursos serão utilizados e quais emissões serão liberadas para ar, água e solo que podem estar associados ao sistema. Ainda é possível realizar a coleta e quantificação de todas as variáveis: matéria prima, energia, transporte, emissões, efluentes, resíduos, e outras variáveis necessárias.

De acordo com Saade (2017), nesta fase, devem ser descritos os processos unitários contidos dentro das fronteiras do sistema que foram previamente definidas, e seus respectivos fluxos de matéria e energia devem ser refinados e quantificados.

Os dados de entrada e saída podem ser coletados nos locais associados aos processos do sistema do produto, ou podem ser obtidos e calculados a partir de outras fontes. No caso em que os dados são obtidos diretamente nos locais de produção, definem-se como dados primários. Já no caso em os dados são obtidos através de outros estudos (exemplo, revisão da literatura), definem-se os dados como secundários e podem incluir uma mistura de dados medidos, calculados ou estimados (Reis, 2020).

Segundo a NBR ISO 14044 (ABNT, 2014), após a coleta dos dados, são necessários procedimentos de cálculo a fim de garantir que todos os fluxos de entrada e saída do sistema de produto estejam correlacionados com os processos elementares, com os fluxos de referência e com a unidade funcional selecionada, ou seja, é preciso gerar resultados do inventário para o sistema específico em estudo. Todos os procedimentos de cálculo devem ser claramente declarados e justificados.

O Inventário de Ciclo de Vida (ICV), segundo Mueller *et al.* (2004), é uma ferramenta indispensável para a avaliação quantitativa de impactos ambientais. Ainda segundo os autores, é a fase de uma Avaliação de Ciclo de Vida que mais despende tempo e energia, dependendo da confiabilidade dos resultados obtidos nas outras etapas.

Reichert (2013) alerta que, a grande quantidade de dados gerados nesta fase resulta em um desafio para a tomada de decisão. O mesmo autor destaca que modelos computacionais devem ser utilizados para o agrupamento destes dados.

### 2.2.1.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Trata-se da fase da ACV que visa ao entendimento e à avaliação da magnitude e significância dos potenciais impactos ambientais de um sistema de produto ao longo do ciclo de vida do produto. Os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do produto ou serviço estão relacionados com os inputs e outputs do sistema de produto levantados e quantificados na fase de inventário. Na avaliação de impacto, os dados de inventário são associados com categorias de impacto específicas e indicadores de categoria, tentando dessa forma quantificar tais impactos (Saade, 2017).

As categorias de impacto relevantes e seus respectivos potenciais de impacto são estabelecidos e é realizado o cálculo dos indicadores de cada categoria. A agregação dos resultados, por vezes ponderados, define o perfil da AICV e fornece informações relativas aos impactos ambientais associados ao consumo de recursos e emissões ao meio (Sonnemann *et al.*, 2003).

De acordo com Klöpffer e Grahl (2014), a NBR ISO 14044 não fornece uma lista de categorias de impacto e nem mesmo recomendações, portanto a seleção de categorias depende inteiramente dos praticantes da ACV. No entanto, a metodologia de AICV permite analisar várias categorias de impactos através de indicadores.

A seleção de categorias de impacto deve refletir um conjunto abrangente de questões ambientais relacionadas ao sistema de produto em estudo, levando em consideração ao objetivo e escopo (Ige *et al.*, 2022).

Existe um número considerável de diferentes métodos de avaliação de impactos disponíveis, grande parte deles é implementada em softwares comerciais (Dreyer *et al.*, 2003). Segundo Saade (2017), alguns dos principais métodos são: CML 92e 01; CVAPBI; CAAGE; Eco-indicator 95 e 99; EDIP 1997 e 2003; EPS 2000; EGHT; ExternE Project; Impact 2002+;

IPCC; LCA-net scheme; TRACI; WAR algorithm; e ReCiPe (2008) e (2016).

Cada método considera um conjunto específico de categorias de impacto (midpoint ou endpoint), assim como suas relações. Alguns métodos foram desenvolvidos, principalmente, a partir dos primeiros anos da década de 1990, e esses métodos não foram discutidos no conjunto de normas da NBR ISO 14040 (Finnveden *et al.*, 2009).

Com o aumento da demanda para aplicação de ACV nos mais diversos setores e áreas, foi necessária a criação de ferramentas que pudessem auxiliar e otimizar a realização destes estudos. Assim, muitas empresas começaram a desenvolver programas computacionais para este fim. E devido a esta demanda que não para de crescer, existe uma grande variabilidade de programas, sendo necessário que cada pesquisador ou profissional que vá utilizar esta ferramenta, avalie qual ferramenta melhor se enquadra nos objetivos que está buscando (Kalbusch, 2011).

A utilização de programas computacionais visando auxiliar o desenvolvimento de estudos de ACV tem aumentado, tendo em vista que a quantificação de impactos e os cálculos envolvidos em uma ACV podem ser muito complexos. O uso de programas computacionais para apoio à ACV produz resultados com maior agilidade e confiabilidade (Ribeiro, 2015).

#### 2.2.1.4 Interpretação

Na interpretação do ciclo de vida, os resultados da avaliação do ciclo de vida são avaliados para responder às questões colocadas na definição do objetivo. A interpretação está relacionada, de acordo, com as aplicações pretendidas do estudo ICV/ACV e é usada para desenvolver recomendações. A interpretação do ciclo de vida é a fase da ACV onde os resultados das outras fases são, portanto, considerados coletivamente e analisados à luz da precisão alcançada, completude e precisão dos dados aplicados, e das suposições, que foram feitas ao longo do estudo ICV/ACV (ILCD HANDBOOK, 2010).

Nessa última fase, os resultados da análise do inventário e da avaliação de impacto são confrontados com o objetivo e o escopo definidos, visando alcançar conclusões e recomendações para os tomadores de decisão (Saade, 2017).

A pergunta básica a ser feita é: *Qual é a melhor alternativa e quais são os critérios que a definem?* Essa confrontação poderá resultar em revisão ou alteração, em alguma das outras fases da ACV, identificando possíveis vulnerabilidades do estudo, e através das

iterações, se necessário, revisar e alterar os resultados e outras fases da ACV (Hauschild; Barlaz, 2011).

Nesta etapa de uma ACV, deve-se incluir: a verificação da completeza para assegurar que todas as informações relevantes e os dados para interpretação estejam disponíveis e completos; a verificação da sensibilidade para avaliar a confiabilidade dos resultados e conclusões; e a verificação da consistência para checar se as suposições, métodos e dados são consistentes com o objetivo e escopo (Araujo, 2013).

É possível concluir, pelas informações apresentadas, que a condução de uma ACV com base nas normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2025) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2014) deixa várias decisões à critério de quem a executa, com destaque para a definição das fronteiras dos sistemas a ser analisado, a seleção das fontes de dados de inventário e a ponderação das diversas categorias de impacto. Pode então concluir, que não há um único método capaz de conduzir um estudo de ACV, e as organizações têm total liberdade para aplicar em um estudo de ACV, de acordo com suas pretensões (Crawford, 2011).

### 2.2.2 Economia Circular (EC) na Construção Civil.

Define-se Economia Circular (EC) como um sistema regenerativo, no qual as entradas, podendo ser elas: insumos, resíduos e emissões, são reduzidas ou podem ser totalmente reaproveitadas ou recuperadas (Geissdoerfer *et al.*, 2017). Ainda conforme os mesmos autores, este objetivo de reaproveitamento ou recuperação pode ser alcançado empregando várias técnicas baseadas no projeto do produto, em manutenção, em reparos, em reuso, remanufatura, reforma e reciclagem, não vinculando o crescimento econômico ao uso do recurso dos recursos naturais daquele produto (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

Acerbi e Taisch (2020) destacam que existem diversos ganhos com a utilização da técnica de circularidade, no entanto, os mesmos autores afirmam que não existe uma clara definição de como a circularidade deve ser implementada, sendo confundida, em muitas vezes, com o termo sustentabilidade.

Para Elgie *et al.*, (2021), EC é um processo interminável de uso de recursos, reutilização, reparo e reciclagem, no qual os materiais que em muitas situações podem ser descartados, são controlados como uma mercadoria que é compartilhada continuamente.

A Fundação Ellen McArthur, organização criada em 2009 no Reino Unido, define a EC como 'uma estrutura de solução de sistemas que aborda desafios globais, como mudanças climáticas, perda de biodiversidade, resíduos, e poluição (EMF, 2009).

Um interessante conceito, expresso por Niero e Hauschild (2017), descreve a circularidade como “manter os produtos, os seus componentes e seus materiais em sua máxima utilidade em todas as circunstâncias possíveis”.

Segundo Tazi *et al.* (2021) existem diversas definições e uma desigualdade de compreensões sobre o que realmente é EC, no entanto, a maioria concorda que a EC é um meio bem-sucedido de controlar o desperdício e gerenciá-lo; esse conceito foi implementado em vários campos, desde o fornecimento de equipamentos elétricos e eletrônicos até a fabricação de automóveis, bem como no setor de da construção civil.

Reike *et al.*, (2018) afirmam que o primeiro artigo sobre economia circular data de 2007, e os autores ainda acrescentam que mais de dois terços do total de 101 publicações listadas sobre a temática se concentraram entre os anos de 2015 e 2017.

Várias organizações, como a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) vêm expressando, através de relatórios emitidos por essas organizações, a urgência de encontrar tecnologias e metodologias eficientes para fechar os ciclos de materiais (UNEP, 2016; OCDE, 2016).

E como forma de resolver esta problemática de circularidade dos materiais a EC tem como principal finalidade a desenvolver novos modelos econômicos que possam reverter as tendências atuais de desperdício e ter um impacto positivo na sociedade e no meio ambiente, em termos de redução do uso de recursos naturais, gerando benefícios sociais, ambientais e econômicos (González *et al.*, 2021).

A Economia Circular contém vários conceitos, como a reutilização e/ou reciclagem e remanufatura, com o objetivo de tornar os materiais seguros para as pessoas e para o meio ambiente, conforme os parâmetros de qualidade do berço ao berço. Nesse sentido, objetiva-se reduzir o potencial do impacto ambiental em todas as fases de um sistema construtivo, sendo algumas das possíveis soluções: integração da utilização de energias renováveis e de painéis solares, e também de reduzir o desperdício de água potável (MBDC LLC, 2013).

O setor da Construção Civil tem um consumo estimado em 40% final de energia bruta; 35% das emissões de gases de efeito estufa; 50% dos recursos materiais extraídos são direcionado para o setor; 30% do consumo de água; e 35% da geração de resíduos pertencem

a esta área de atuação (Huerta *et al.*, 2018). Nesse sentido, deve-se repensar a forma como estão sendo realizadas construções a fim de que possa ocorrer uma redução da pressão sobre os recursos não renováveis e os resíduos gerados.

A Global Footprint Network, um órgão que estima a pegada ecológica todos os anos, declarou em suas medições em 2022 que já teríamos esgotado a biocapacidade do planeta, o mesmo órgão acrescenta um dado alarmante, que “os humanos usam tantos recursos ecológicos como se vivessem em 1,75 Planetas Terras” (Global Footprint Network, 2022), esta declaração soma aos dados negativos anteriormente apresentados. Além do mais, as pessoas migraram do campo para as cidades aumentando o desmatamento e diminuindo a biodiversidade; atualmente, mais de 8 bilhões de pessoas agora povoam o planeta, “desde o início dos tempos na Terra até o início do século 20, a população do planeta cresceu de zero para 1,6 bilhão”. Então, graças a muitos fatores, “a população aumentou em mais de 6,1 bilhões em apenas 100 anos, o que é um aumento de quase quatro vezes no número de seres humanos em um período relativamente curto”; isso cria uma superpopulação que precisa de mais recursos e que emite mais gases causadores das mudanças climáticas (Mayer, 2022). Sendo que estes fatos reforçam ainda mais a necessidade de uma economia circular dos materiais a fim de utilizá-los em sua máxima capacidade em todas as etapas (Figura 1).

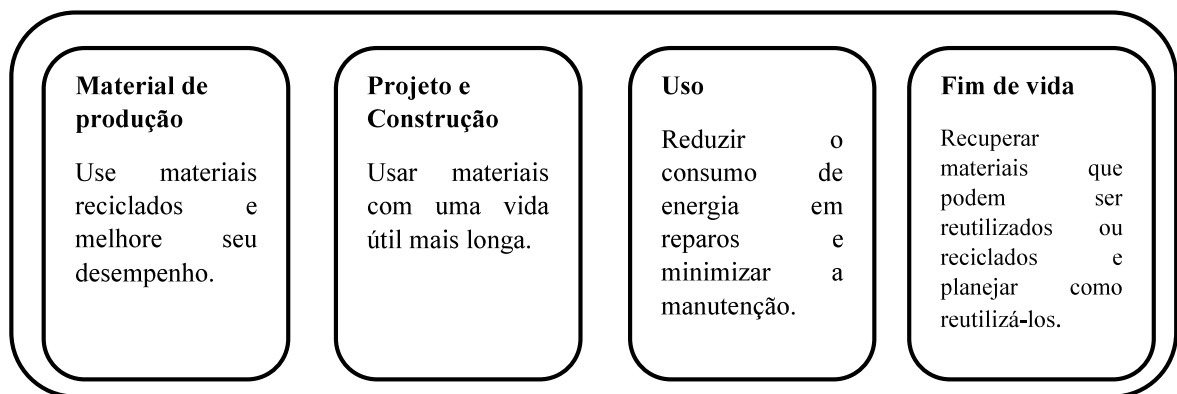


Figura 1 - Processo para melhorar a circularidade dos materiais no setor da construção civil (Fagone *et al.*, 2023).

Conforme destacado por Fagone *et al.* (2023) na Figura 1, deve-se sugerir como forma de melhorar a circularidade dos materiais no setor da construção civil, que seja dividido em quatro etapas principais. Deve-se priorizar o uso de materiais reciclados e a melhora de desempenho dos materiais já constituídos; usar com tempo de vida útil maior; quando, possível minimizar a manutenção e reduzir consumo de energia com reparos; além de

recuperar materiais que podem ser reutilizados ou reciclados e planejar como reutilizá-los. Ainda segundo os autores, estas estratégias buscam contemplar todo o ciclo do berço ao berço, incluindo operações de reutilização ou reciclagem, em vez de terminar a ACV na fase de fim de vida.

Com a introdução de conceitos de economia circular no setor da construção, objetiva-se limitar significativamente o impacto ambiental das atividades humanas relacionadas com edifícios e infraestruturas, bem como ajudar a reduzir o impacto do ambiente construído ao longo do seu ciclo de vida, criando edifícios resilientes que podem responder de forma mais eficaz às questões ambientais, energéticas e de crises econômicas (Fisher, 2019). No entanto, apesar da urgência de ter um sistema econômico sustentável e apesar do enorme impacto do setor da Construção Civil, ainda não foi formulada uma metodologia abrangente para monitorar e avaliar a circularidade no setor. Para Merli (2018) a temática de Economia Circular é um tema de pesquisa muito complexa, com extensas abordagens teóricas e ferramentas práticas que podem promover mudanças, sejam elas políticas, sociais ou econômicas.

Segundo Fagone *et al.* (2023) um canteiro de obras que executa os princípios da economia circular é caracterizado por um sistema que gerencia e coleta resíduos e os excedentes em cada etapa, visando sua reutilização. O processo de construção envolve três fases: fornecimento e armazenamento de materiais, deslocamento no local e manejo para o local adequado. Os excedentes são separados e coletados para reaproveitamento. Os materiais não utilizados podem ser reutilizados, seja internamente (produção de agregados a partir de “sobras”) ou externamente (envio de sucatas para reciclagem). Assim, a abordagem da metodologia em um canteiro de obra circular pode ser visualizada como um ciclo duplo, compreendendo interno e outro externo, onde os recursos, bem como os excedentes ou resíduos originados durante a etapa construtiva, são cuidadosamente administrados para possibilitar sua reutilização e reaproveitamento, conforme a Figura 2, a seguir:

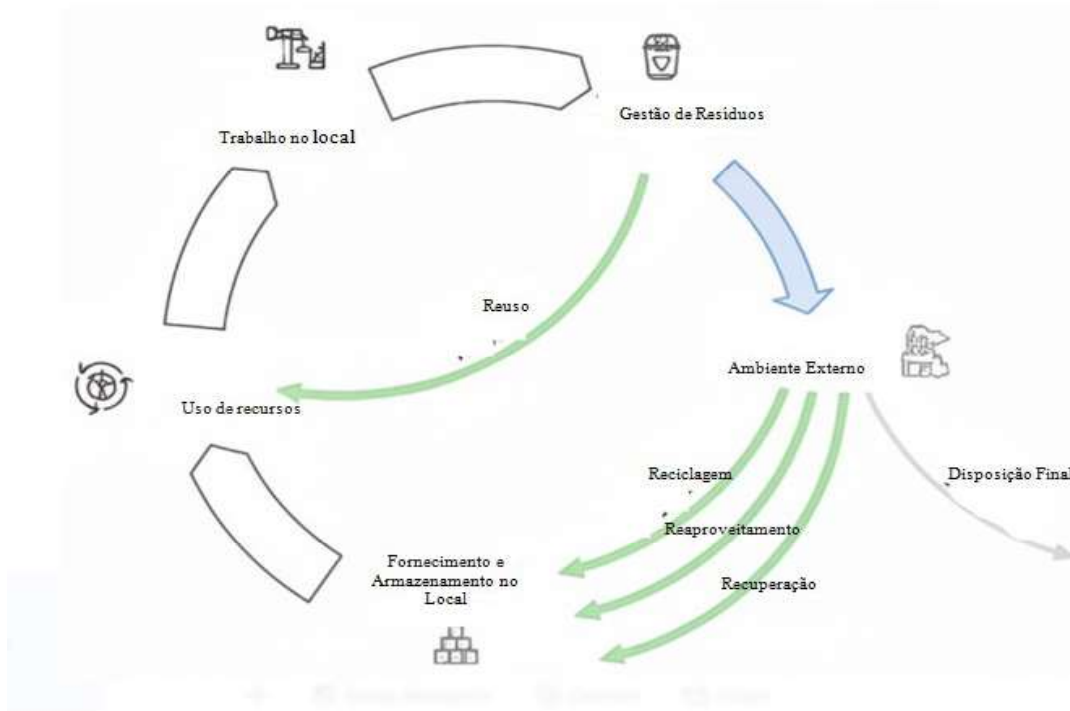


Figura 2 – Metodologia do canteiro de obras (Fagone *et al.*, 2023)

O ciclo interno se concentra na reutilização direta de materiais como subprodutos, os quais não requerem procedimentos complexos para conversão de resíduos, resultando em um produto de valor inferior ao original. Por outro lado, o ciclo externo explora todas as potenciais abordagens circulares para reintegrar esses materiais como recursos em novos ciclos, mantendo o mesmo valor, agregando um valor superior ou atribuindo-lhes um novo propósito (Fagone *et al.*, 2023).

Segundo Rico e Alencar (2021) existiu um maior interesse da Economia Circular na Engenharia Civil a partir de 2018. Isso reforça o que é descrito por Geissdoerfer *et al.* (2021), que descreve que as empresas do setor da construção civil estão cada vez mais adotando práticas circulares, impulsionadas tanto pelas regulamentações governamentais, em constante evolução, quanto pela conscientização da sociedade sobre os impactos, não consideradas anteriormente. Esse movimento tem impulsionado os princípios circulares a se integrarem aos próprios modelos de negócios das empresas do setor.

Rico e Alencar (2021) afirmam que as discussões sobre circularidade dos materiais na construção civil, de maneira geral, vêm ocorrendo em diversas nações, abrangendo desde países como o Reino Unido, China e Austrália, bem como nações em desenvolvimento, a exemplo do Brasil, Colômbia e Nigéria. Os mesmos autores destacam que o principal eixo de

debate quanto à circularidade dos materiais é sobre os resíduos de construção e demolição, sendo possível, segundo Kravchenko *et al.* (2019), alcançar uma recuperação de quase 90% dos resíduos originados nos processos de construção e demolição.

Para Ratnasabapathy *et al.* (2020) a definição de objetivos de reciclagem, a imposição de limites percentuais para a disposição de produtos e resíduos, bem como a implementação de incentivos para equipes alcançarem um melhor desempenho, devem ser práticas e amplamente adotadas nas estratégias de gestão de resíduos e demolições. No entanto, observa-se que a abordagem de Economia Circular no setor da construção ainda está em um estágio inicial de desenvolvimento, em grande parte devido à concentração predominante de estudos na área de gestão de resíduos e demolições. Nesse contexto, é crucial explorar outras iniciativas que possibilitem um avanço mais claro e uma maturidade mais sólida das estratégias nesse setor.

Outro eixo que vem discutido a respeito da Economia Circular na Construção Civil é sobre a utilização de ferramentas tecnológicas no setor, que podem ser: programas, plataformas e aplicativos que auxiliem o usuário nas fases de projeto, construção, uso e demolição. Segundo O'Grady *et al.* (2010) a integração de “gêmeos” digitais em ambientes de realidade virtual, combinada ao emprego de software de modelagem de informações de construção, viabiliza a incorporação e a aplicação dos princípios da economia circular em projetos de construção, podendo resultar em empreendimentos que possam atingir níveis de sustentabilidade desejáveis.

Soma-se a esse eixo, outro que vem sendo discutido é a gestão de materiais sustentáveis. Os Materiais Sustentáveis são aqueles que possuem atributos cruciais em sua produção e uso, preservando a integridade ambiental, exibindo selos ecológicos ou sendo avaliados por sistemas de controle de qualidade (Hassan, 2016). A administração dos Materiais Sustentáveis está basicamente ligada aos critérios de aquisição de suprimentos destinados à construção. Isso ocorre porque as especificações desses materiais se transformam em características fundamentais para a escolha de materiais e a contratação de produtos ou serviços (Onubi *et al.*, 2020).

Para Rico e Alencar (2021), de forma geral, observa-se um aumento no interesse e na pressão das empresas em adotar práticas sustentáveis em suas atividades. Apesar da implementação de estratégias de EC envolver um conjunto de desafios que podem restringir a sua adoção, que podem ser: custos elevados de implementação, falta de treinamento e conscientização das equipes, políticas internas robustas e regulamentações claras do governo

(Guerra & Leite, 2020). No entanto, para Trindade *et al.* (2020) o sucesso, ao longo do tempo, tende a acompanhar as empresas que incorporarem práticas de EC em suas operações.

### 2.2.2.1 Indicadores de Circularidade de Materiais

Os indicadores de circularidade foram elaborados com a finalidade de auxiliar as organizações a avaliarem e comunicarem o avanço de seus empreendimentos em relação à EC. Essas métricas desempenham um papel fundamental como um guia de tomada de decisões, possibilitando a comparação de diversos materiais, produtos e processos em diferentes contextos, a fim de avaliar a circularidade (EMF, 2019).

Dado que a temática da circularidade é multifacetada e está em constante evolução, a mensuração da circularidade pode levar a diversas interpretações distintas (Rigamonti & Mancini, 2021).

Alguns autores como Kristensen e Mosgaard (2020), Moraga *et al.* (2019), Rossi *et al.* (2019) e Saidani *et al.* (2019) classificam as métricas de circularidade em três categorias:

- a) Macro: utilizadas para mensurar a circularidade de países, regiões ou cidades;
- b) Meso: as direcionadas para medição de circularidade de parques industriais; e
- c) Micro: as quais abrangem a circularidade de empresas e produtos.

No contexto dos indicadores de nível micro o Material Circularity Indicator (MCI) se destaca como o indicador mais amplamente referenciado, abrangente e elegível, uma vez que incorpora tanto os fluxos de materiais quanto a vida útil do produto (Vadoudi *et al.*, 2022).

O MCI é essencialmente construído através da combinação de três características do produto: a quantidade de matéria-prima virgem (V) utilizada na fabricação, a quantidade de resíduos não recuperáveis (W) atribuída ao produto e um fator de utilidade (X) que leva em consideração a durabilidade e a intensidade de uso do produto (EMF, 2015), além de outros parâmetros conforme a Tabela 1, a seguir.

Tabela1 - Parâmetros empregados para o cálculo do MCI.

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade de medida</b>	<b>Definição</b>
M	kg	Massa do produto
Fr	%	Porcentagem de matéria-prima de fontes recicladas no produto

Tabela 1 - Parâmetros empregados para o cálculo do MCI (Continuação).

Fu	%	Porcentagem de matéria-prima de fontes de reuso no produto
Fs	%	Porcentagem de matéria-prima de fontes biológicas
V	kg	Massa de matéria-prima virgem usada no produto
Cc	%	Porcentagem do produto coletada e destinada à compostagem
Ce	%	Porcentagem do produto coletada e destinada à recuperação de energia O material deve ser biológico
Cr	%	Porcentagem do produto coletada e destinada à reciclagem
Cu	%	Porcentagem do produto destinada à reutilização
Ec	%	Eficiência do processo de reciclagem do material que foi utilizado no produto que quando em fim de vida, foi destinado à reciclagem
Ee	%	Eficiência do processo de recuperação de energia
Ef	%	Eficiência do processo de fabricação da matéria-prima reciclada para ser utilizada no produto
L	anos	Vida útil média real do produto
Lav	anos	Vida útil média real de produtos de mesma função
U	quantidade	Número médio real de unidades funcionais atingidas durante o uso do produto
Uav	quantidade	Número médio real de unidades funcionais obtidas durante o uso do produto médio de mesma função
W	kg	Massa de resíduos irre recuperáveis associados ao produto
W0	kg	Massa de resíduos irre recuperáveis associados ao produto que vão para aterros, geração de energia ou outro tipo de processo no qual o material não é recuperável
Wc	kg	Massa de resíduos irre recuperáveis gerados no processo de reciclagem de partes do produto
Wf	kg	Massa de resíduos irre recuperáveis gerados na produção de matéria-prima reciclada para o produto
LFI	-	Índice de linearidade
X	-	Utilidade do produto
F(X)	-	Fator de utilidade em função da utilidade X do produto

Fonte: Adaptado de EMF (2015).

Segundo a EMF (2015) para o cálculo do MCI, devem ser consideradas as seguintes entradas:

- Entradas do processo: considera o quanto do material é de origem virgem, reciclada ou reutilizada.
- Utilização durante a etapa de uso: considera a durabilidade do produto.
- Destinação pós-uso: considera o destino do produto, como reciclagem ou reutilização.
- Eficiência da reciclagem: eficiência do processo de reciclagem do material que foi usado como matéria prima no produto e a eficiência do processo de reciclagem desse material utilizado no produto após a vida útil do mesmo.

As equações para o cálculo do MCI de Ellen MacArthur Foundation (2015) são apresentadas, seguir:

- Material virgem

A quantidade de material virgem utilizado para na produção de um produto é determinada pela Equação 1:

$$V = M \times (1 - Fr - Fu) \quad (1)$$

Onde:

V: Massa de matéria-prima virgem usada em um produto;

M: Massa do produto acabado;

Fr: Fração de matéria-prima proveniente de fontes recicladas;

Fu: Fração de matéria-prima proveniente de fontes reutilizadas.

- Resíduos irre recuperáveis

Se Cr representa à fração da massa do produto que é coletado para reciclagem no fim de sua fase de uso e Cu a fração da massa do produto indo para reutilização, a quantidade de resíduos destinados a aterros ou a recuperação de energia é representada pela Equação 2:

$$W_o = M \times (1 - Cr - Cu) \quad (2)$$

Onde:

$W_o$ : Massa de resíduos irrecuperáveis de um produto que vai para aterro;  
 M: Massa do produto; Cr: Fração de massa do produto coletado para o processo de reciclagem;  
 Cu: Fração de massa de um produto em reutilização de componentes.

- Resíduos gerados no processo de reciclagem

Se  $E_c$  é a eficiência do processo de reciclagem utilizado para a reciclagem do produto no final da fase de uso, a quantidade de resíduos gerados no processo de reciclagem é dada pela Equação 3:

$$W_c = M \times (1 - E_c) \times Cr \quad (3)$$

Onde:

$W_c$ : Massa de resíduos irrecuperáveis do processo de reciclagem;  
 M: Massa do produto;  
 $E_c$ : Eficiência do processo de reciclagem;  
 Cr: Fração de massa do produto coletado para o processo de reciclagem.

Também haverá resíduos gerados para produzir qualquer conteúdo reciclado usado como matéria-prima. Isso é dado pela Equação 4.

$$W_f = M \times E_f \times (1 - E_f) \times Fr \quad (4)$$

Onde:

$W_f$ : Massa de resíduos irrecuperáveis gerada ao produzir matéria-prima reciclada;  
 $E_f$ : Eficiência do processo de reciclagem para produzir a matéria-prima reciclada;  
 M: Massa do produto; Fr: Fração de matéria-prima proveniente de fontes recicladas.  
 Fr: Fração de matéria-prima proveniente de fontes recicladas.

- Rejeitos totais e irrecuperáveis.

A quantidade de rejeito total irrecuperável de um produto é representada pela Equação 5:

$$W = \frac{W_0 + (2W_f + W_c)}{2} \quad (5)$$

Onde:

W: Rejeito total e irrecuperável;

W<sub>0</sub>: Massa de resíduos irrecuperáveis de um produto que vai para aterro;

W<sub>c</sub>: Massa de resíduos irrecuperáveis do processo de reciclagem;

W<sub>f</sub>: Massa de resíduos irrecuperáveis gerada ao produzir matéria-prima reciclada;

- Índice de Fluxo Linear

O Índice de Fluxo Linear (LFI) mede a proporção de material fluindo de forma linear, isto é, advindo de materiais virgens e acabando com desperdício irrecuperável. Então o LFI é calculado dividindo a quantidade de material que flui de forma linear pela soma das quantidades de material fluindo de uma forma linear e restauradora (ou fluxo de massa total, para breve). O índice recebe um valor entre 1 e 0, em que 1 é um fluxo completamente linear e 0 a fluxo completamente restaurativo, representado pela Equação 6.

$$LFI = \frac{V + W}{2 \times M + \left(\frac{W_f - W_c}{2}\right)} \quad (6)$$

Onde:

V: Massa de matéria-prima virgem usada em um produto;

W: Massa total de resíduos irrecuperáveis associadas ao produto;

W<sub>f</sub>: Massa de resíduos irrecuperáveis gerada ao produzir matéria-prima reciclada;

W<sub>c</sub>: Massa de resíduos irrecuperáveis do processo de reciclagem;

- Fator utilitário

O utilitário X é o cálculo da duração e intensidade que um produto é utilizado em comparação com produtos similares. Tendo dois componentes: um responsável pela duração da fase de uso do produto (tempo de vida) e outro para a intensidade de uso (unidades funcionais). Sendo apresentado na Equação 7.

$$X = \left(\frac{L}{L_{av}}\right) \times \left(\frac{U}{U_{av}}\right) \quad (7)$$

Onde:

X: Utilidade de um produto;

L: Tempo de vida médio de um produto;

U: Número médio de unidades funcionais durante o uso de um produto;

Lav: Tempo de vida médio de produtos similares;

Uav: Número médio de unidades funcionais durante o uso de produtos similares.

- Indicador de Circularidade de Material

O Indicador de Circularidade Material de um produto é definido considerando o Índice de Fluxo do produto e um fator  $F(X)$ , calculada através da equação 8, construído como uma função  $F$  da utilidade  $X$  que determina a influência da utilidade do produto em seu MCI. A equação 9 é usada para calcular MCI do produto:

Então  $F$  é:

$$F(X) = \frac{0,9}{(X)} \quad (8)$$

$$MCI = 1 - LFI \times F(X) \quad (9)$$

Onde:

MCI: Indicador de Circularidade Material de um produto,

LFI: Índice de Fluxo Linear.

O MCI atribui uma pontuação variando de 0 a 1 para representar o nível de circularidade de um produto de materiais, onde valores mais próximos de 1 indicam um nível mais elevado de circularidade do produto. Devido à sua inclusão de parâmetros relacionados à reutilização, a materiais reciclados, à eficiência do processo de reciclagem, à vida útil do produto e a seu tratamento ao fim de vida, o MCI é considerado uma métrica robusta (EMF, 2015).

Na análise da circularidade, é assumido que um produto fabricado exclusivamente com materiais virgens que, eventualmente, é descartado em um aterro sanitário, é classificado como um produto linear. Em contrapartida, qualquer produto que não contenha materiais virgens e que seja completamente recolhido para fins de reciclagem ou reutilização, com uma eficiência de reciclagem de 100%, é considerado um produto totalmente circular (Vadoudi *et al.*, 2022).

É importante observar que este indicador está sujeito a certas suposições e restrições, tais como a suposição de que o material recuperado após o uso pode ser tratado com uma qualidade comparável à do material virgem original, e a premissa de que não ocorrem perdas de material durante o processo de preparação dos produtos coletados para a reutilização (EMF, 2015).

Devido à sua natureza como um indicador que pode ser prontamente aplicado e usado de maneira fácil por empresas, permitindo a identificação de valor adicional na EC de seus produtos e materiais, esse indicador ganhou crescente popularidade como um meio de avaliar a circularidade (EMF, 2017).

Além do MCI, há outro indicador de circularidade, o Circular Transition Indicators (CTI).

Segundo a WBCSD (2021), o CTI tem objetivo fundamental oferecer uma estrutura universal, transparente, objetiva e quantitativa que possa ser aplicada a empresas de todos os setores, portes, posicionamentos na cadeia de valor e geografias. A filosofia central do CTI é a de ser uma ferramenta de análise interna e autoavaliação, projetada para catalisar a melhoria contínua dentro de uma organização.

Conforme destacado pela WBCSD (2021), a análise fundamental do CTI começa com a quantificação dos fluxos de massa que atravessam os limites da empresa. O indicador principal, *% Circularidade de Materiais*, é uma agregação dos dois componentes primários: o inflow (entradas) e o outflow (saídas).

As métricas fundamentais, conforme a WBCSD (2021), são:

- Cálculo do % Inflow Circular (IC%)

Este indicador mede a circularidade dos insumos adquiridos pela empresa. Ele quantifica a proporção da massa total de entradas que é proveniente de fontes não-írgens, ou seja, de conteúdo reciclado/secundário ou de fontes renováveis geridas de forma sustentável (equação 10).

$$IC\% = \frac{(M_{NV} + MR)}{M_{ITotal}} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

$M_{NV}$ : Massa de material não-írgem (conteúdo reciclado ou secundário).

$M_R$ : Massa de material renovável (biomassa de fontes geridas de forma sustentável).

$M_V$ : Massa de material virgem (recursos finitos extraídos da natureza).

$M_{ITotal}$ : Massa total de inflow, calculada como  $M_{ITotal} = M_{NV} + M_R + M_V$ .

- Cálculo do % Outflow Circular

Este indicador mede a circularidade das saídas da empresa. Ele quantifica a proporção da massa total de produtos e subprodutos que é efetivamente recuperada no final de sua vida útil, através de vários ciclos de recuperação como reutilização, reparo, remanufatura e reciclagem (equação 11).

$$OC\% = \left( \frac{M_{ORecip}}{M_{OTotal}} \right) \times 100 \quad (11)$$

Onde:

$M_{ORecip}$ : Massa de outflow (produtos, subprodutos, embalagens) que é efetivamente recuperada para reentrar na economia.

$M_{OLinear}$ : Massa de outflow que segue um caminho linear, destinada a aterros sanitários ou incineração sem recuperação de valor material.

$M_{OTotal}$ : Massa total de outflow, calculada como  $M_{OTotal} = M_{ORecip} + M_{OLinear}$ .

- Equação Final da % Circularidade de Materiais ( $C_{Mqu}$ )

O indicador principal do CTI, % *Circularidade de Materiais*, consolida o desempenho de inflow e outflow em uma única métrica. Ele é calculado como a média das porcentagens de inflow e outflow circulares, ponderada pela massa total de cada fluxo. (equação 12).

$$CM\% = \frac{(IC\% \times M_{ITotal}) + (OC\% \times M_{OTotal})}{M_{ITotal} + M_{OTotal}} \quad (12)$$

### 2.2.3 Principais Conceitos sobre Geossintéticos

A Sociedade Internacional de Geossintéticos – IGS (2018), explica que geossintéticos são materiais industrializados em que, ao menos, um dos seus componentes é fabricado com polímeros sintéticos ou naturais. Peralta (2007), acrescenta que os geossintéticos são usados em combinação com solos, rochas ou outros materiais, podendo ser

parte integrante de um projeto, estrutura ou sistema geotécnico. Os geossintéticos podem ter a forma de tiras, de manta ou de estrutura em três dimensões e, com relação às suas aplicações, podem ser: na área geotécnica, na engenharia civil e em aplicações ambientais.

Entre os tipos de geossintéticos comumente empregados na Engenharia Civil podem ser citados os seguintes: geotêxteis (tecidos e não tecidos), geogrelhas, geocélulas, geomantas, geotubos, geoeexpandidos, geotiras, geomembranas e geocompostos (IGS, 2018).



Figura 3 - Tipos de geossintéticos (IGS, 2018).

Os geossintéticos podem ser aplicados nas áreas geotécnicas, ambientais, hidráulicas e de transporte. Diante dessa versatilidade, os geossintéticos, podem possuir várias funções nos sistemas construtivos que os compõe, que se destacam as seguintes: separação, filtração, drenagem, reforço, contenção de fluidos/gases, ou controle de processos erosivos. Em alguns casos, o geossintético poderá desempenhar dupla função. A norma ABNT NBR 10318 (ABNT, 2018) detalha as seguintes funções dos geossintéticos:

- Drenagem que é a coleta e transporte de precipitação, águas subterrâneas e/ou outros fluidos no plano de um material geossintético;
- Filtração que é a restrição da passagem descontrolada de solo ou outras partículas sujeitas a forças hidrodinâmicas, permitindo a passagem de fluidos para dentro ou através de um material geossintético;
- Proteção que é a prevenção ou limitação de danos locais a um determinado elemento ou material pelo uso de um material geossintético;
- O reforço que é o uso do comportamento tensão-deformação de um material geossintético para melhorar as propriedades mecânicas do solo ou de outros materiais de construção;
- A separação que é a prevenção da mistura de solos diferentes adjacentes e/ou materiais de preenchimento pelo uso de um material geossintético;
- O controle da erosão superficial que é o uso de um material geossintético para prevenir ou limitar os movimentos do solo ou de outras partículas na superfície de, por exemplo, um talude.

Além dessas funções, o uso de geossintéticos pode permitir diminuir volumes totais de aterros em taludes, estradas, rodovias e resolver muitos problemas hidráulicos, pode substituir ou complementar materiais convencionais como pedras que são caros e possui muitas deficiências em logística, com isso, podem-se reduzir prazos de obras, bem como reduzir custos comparados às soluções convencionais (Peralta, 2007).

Quando o geossintético exerce a função de reforço, o mesmo é inserido no solo ou em associação com o solo para a melhoria das propriedades de resistência e de deformação do solo natural. Por exemplo, geotêxteis e geogrelhas são usados para acrescentar resistência à tração na massa de solo, de forma a possibilitar muros de solo reforçado verticais ou aproximadamente verticais. Nessas situações, o emprego do reforço possibilita a construção de aterros sobre fundações de solos extremamente moles, bem como a de muros íngremes improváveis de serem viabilizados em solos não reforçados (Ruiz *et al.*, 2017).

Os geossintéticos podem ser fabricados a partir de diversos polímeros, como polietileno (PE), polipropileno (PP), cloreto de polivinila (PVC) e monômero de etileno propilenodieno (EPDM). O betume pode ser usado alternativamente para geomembranas (Touze-Foltz *et al.*, 2012). Poliéster, poliamida e polipropileno são usados na fabricação de geotêxteis. Além disso, vários aditivos (por exemplo, compostos químicos) são usados no processo de fabricação para garantir a durabilidade dos materiais poliméricos. As

características químicas e mecânicas dos geossintéticos dependem fortemente do tipo de polímero utilizado, da formulação do aditivo, da morfologia e da aplicação do geossintético (Hsuan *et al.*, 2008).

#### 2.2.4 Geossintéticos para Prevenção de Deslizamentos de Solos e Estabilização Taludes

Os deslizamentos de terra são definidos como uma forma de perda de massa que inclui uma ampla gama de movimentos do solo, como queda de rochas, colapso profundo de encostas e fluxos de detritos rasos. Deslizamentos de terra podem ser causados por fatores naturais ou pela ação do homem ou podem ser uma combinação destes, como condições de solos fracos, alta pluviosidade e infiltração, erosão por córregos e rios, vibrações causadas por terremotos, aumento da carga vegetativa, carga de vento, escavação, aumento da carga, vibrações causados pelo tráfego ou desmatamento (Shukla, 1997).

Os deslizamentos de terra podem ser controlados melhorando as condições de drenagem, cultivando mais vegetação nas encostas, fornecendo estruturas de retenção adequadas e usando algumas técnicas de melhoria do solo recentemente desenvolvidas, como o reforço do solo (Mohri *et al.*, 2009; Cuomo *et al.*, 2020).

Os geossintéticos podem ser muito atrativos para obras quando envolvem aterros construídos com solos frágeis. Eles provaram ser uma alternativa econômica a outros métodos de estabilização de solos, com desaguamento, escavação e substituição por materiais granulares selecionados, ou quando for necessário o uso de camadas de agregados de estabilização mais espessas ou estabilização química (Correia; Zornberg, 2018).

Basicamente, as camadas de geossintéticos podem servir como materiais de reforço ou podem acelerar o processo de consolidação do subleito macio. O reforço também reduz o consumo de material de enchimento, pois minimiza ou evita mecanismos de falhas locais causadas por equipamentos de construção durante o transporte, espalhamento e compactação do material de enchimento (Palmeira, 2018).

O advento dos materiais de reforço geossintéticos trouxe uma nova dimensão de eficiência para o projeto e construção de taludes armados (Figura 4).

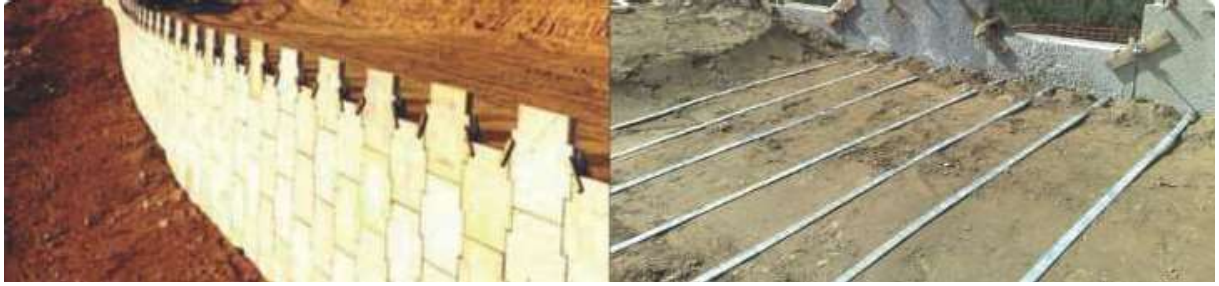


Figura 4 – Terra Armada (Reinforced Earth, 2014).

As paredes reforçadas com geossintéticos (Figura 5), são agora uma tecnologia madura e comprovada em quase todos os países (Allen *et al.*, 2011; Bathurst, 2014). Os taludes reforçados com geossintéticos são geralmente aterros de preenchimento compactados que incorporam camadas horizontais de geossintéticos como reforço de tração para aumentar a estabilidade. O uso de geossintéticos para estabilização de taludes permite que obras de terra sejam redimensionadas alterando sua geometria e ainda permite a utilização de solos com propriedades mecânicas médias (Shukla *et al.*, 2012 ). Geotêxteis, tecidos e não tecidos, e geogrelhas estão sendo cada vez mais usados para reforçar encostas íngremes (Shukla *et al.*, 2012).



Figura 5 – Estrutura de solos reforçados com geossintéticos (Ruiz *et al.*, 2018)

Estruturas mais complexas são os muros de contenção de solo reforçado com geossintéticos com revestimentos rígidos (Figura 6), que se caracterizam pelas seguintes características: (1) o uso de um revestimento, que é moldado no local usando procedimentos de construção por etapas, (2) o uso de um reforço de geogrelha de polímero para solo sem coesão para fornecer um bom intertravamento com o solo, (3) o uso de um composto de geotêxtil não tecido e tecido para solos coesivos quase saturados para facilitar a drenagem e o

reforço de tração do aterro, (4) o uso de reforço relativamente curto, e (5) o uso de solo de baixa qualidade no local como aterro, se necessário (Bathurst, 2014).



Figura 6 – Estrutura de solos reforçados com geossintéticos com face em concreto (Rocha; Massimino, 2019).

#### 2.2.5 Estruturas De Solos Reforçados

Os solos possuem baixa resistência à tração. Ao adicionar os reforços, materiais metálicos ou poliméricos com elevada resistência à tração trabalham juntamente ao solo, dessa forma, a massa de solo e reforços tende a agir como um corpo coeso, ao suportar o seu próprio peso e as cargas externas para as quais foi projetado (Gonçalves, 2016).

Os muros de solo reforçado são soluções econômicas, que apresentam grande tolerância a recalques de fundação, além de serem de facilidade construtiva e possuírem prazo de execução reduzido (Ehrlich & Becker, 2009).

Adicionalmente, permitem utilizar o solo disponível no local da obra, o que contribui de forma significativa para reduzir os custos, se comparados a alternativas convencionais. O sistema construtivo possibilita que o reforço seja fixado nas estruturas externas ou ancorado no solo, e exige sistemas de drenagem e de proteção superficial (Gonçalves, 2016).

Uma estrutura em solo reforçado possui um arranjo típico que apresenta também os elementos constituintes desse tipo de muro. A estrutura obtida ao final é essencialmente flexível, com estética adequada e viável economicamente.

O reforço ocorre pela a intrusão do material sintético em um aterro de solo compactado, como ilustrado na Figura 7. A execução do aterro reforçado é feita em camadas,

inclusive utilizando o solo local para reaterro na obra, sempre que possível, de modo a reduzir o custo de transporte. Vermatti (2015) destaca que, o comprimento da intrusão em cada camada é definido na etapa de dimensionamento, na qual são indispensáveis as verificações de:

- Resistência à tração do material de reforço, encontrada no catálogo do fabricante.
- Condições de estabilidade do maciço, que compreendem a estabilidade interna, envolvendo a resistência à tração, arrancamento do reforço da zona de ancoragem; e também a estabilidade externa, envolvendo estudo dos possíveis deslizamentos, tombamento, capacidade de carga e ruptura global externa.

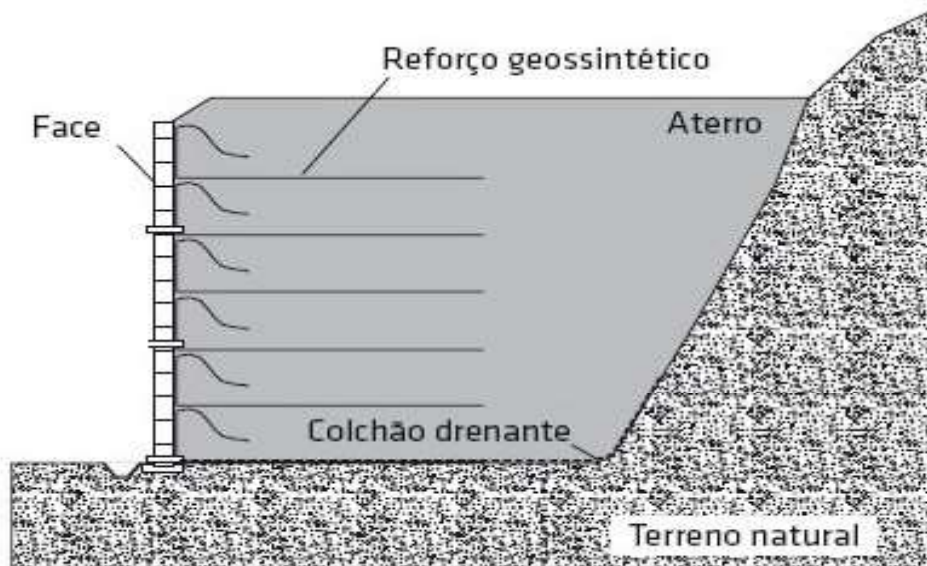


Figura 7 - Seção transversal típica de um muro de solo reforçado com geossintético com face em blocos de concreto (Palmeira, 2018).

A função de drenagem em uma obra de reforço pode ser feita por solos de alta permeabilidade (granulares), geossintéticos ou uma combinação destes. Para o dimensionamento de camadas drenantes, os critérios básicos são de permeabilidade e retenção. O primeiro, garante que o material drenante seja suficientemente aberto para permitir a livre passagem de água sem causar subpressões. Enquanto o segundo, antagonicamente ao primeiro, garante que o material seja suficientemente fechado para reter partículas maiores do solo-base, visando dificultar erosão interna (Gerscovich, 2010).

Segundo Palmeira (2018), as faces das estruturas de solos reforçados com geossintéticos são comumente executadas com placas de concreto, blocos pré-moldados ou

alvenaria. Como alternativa, a face pode receber cobertura vegetal (Figura 8 e 9), entretanto, essa solução demanda mais atenção aos deslocamentos admissíveis do muro.

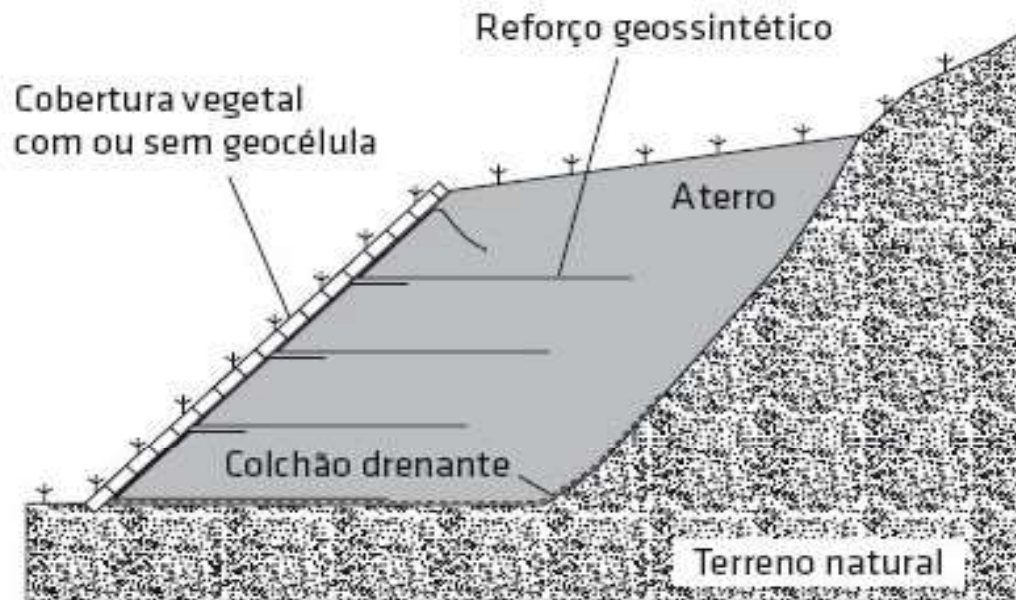


Figura 8 – Seção típica Estrutura de solo reforçado com cobertura vegetal na face (Palmeira, 2018).



Figura 9 – Estrutura de solos reforçados com geossintéticos com incorporação de vegetação na face (adaptado de Vieira, 2008)

Estruturas de solos estabilizados mecanicamente compõem uma solução moderna e aplicável a qualquer altura de maciço. Uma estrutura de contenção feita por solo reforçado é, basicamente, composta por três elementos: solo, reforço e face. Dentre estes, o solo é o componente mais abundante e deve ter massa e volume adequados, bem como uma atenção em sua compactação após lançamento das camadas (Bueno & Vilar, 2015).

Ainda de acordo com os autores Bueno & Vilar (2015), o reforço é o elemento responsável pela estabilidade do conjunto. Em analogia ao concreto armado, a funcionalidade deste material é a mesma do aço, ou seja, resistir aos esforços de tração, mediante aos de compressão dos solos. Por último, o processo construtivo deve prever um revestimento da face do respectivo talude. Apesar de possuir uma contribuição desprezível estruturalmente, a utilização dos elementos de revestimento visa proporcionar, além de aspectos estéticos e proteção contra vandalismo, uma medida de combate à erosão superficial, que em uma situação extrema poderia levar ao colapso da estrutura.

Os reforços flexíveis compostos por geossintéticos podem ser geotêxteis, geogrelhas ou geocompostos resistentes que conferem melhorias nas características mecânicas do maciço reforçado de forma não agressiva ao meio ambiente, uma vez que os elementos são produzidos por polímeros inertes aos locais previstos para aplicação (Vertematti, 2015).

Além disso, conforme Maccaferri (2017) enfatiza, reforços com estes polímeros sintéticos possuem aplicações em taludes mais íngremes, não necessitando de muros robustos para contenção nem equipamentos e mão de obra especializada para execução, constituindo soluções com rápida aplicação e com baixo impacto ambiental.

#### 2.2.6 Aplicação de Avaliação de Ciclo de Vida em Estruturas de Solos Reforçados com Geossintéticos: Revisão Sistemática da Literatura.

A revisão sistemática de literatura difere da revisão tradicional pela adoção de um protocolo de pesquisa. Nela, o pesquisador conduz um processo replicável, científico e transparente de busca literária, documentando decisões, procedimentos e conclusões (Cook *et al.*, 1997).

Kitchenham e Charters (2007) alegam que as razões mais comuns para a realização de uma revisão sistemática de literatura são (i) resumir as evidências existentes acerca de uma tecnologia ou tratamento, ou seja, sumariar as evidências empíricas dos benefícios e limitações de um método específico; (ii) identificar lacunas em pesquisas atuais a fim de

sugerir áreas para investigações futuras; e (iii) fornecer uma estrutura ou pano de fundo para posicionar apropriadamente novas atividades de pesquisa.

A primeira etapa de uma revisão sistemática é formular uma pergunta primária, como parte do protocolo de pesquisa. Uma questão de pesquisa bem formulada pode limitar o tempo e custo de identificação e obtenção de literatura (Wright *et al.*, 2007). A pergunta elaborada para a presente pesquisa foi: “Qual é o estado da arte da Avaliação de Ciclo de Vida em estruturas reforçadas com geossintéticos nos últimos 12 anos?”.

Uma vez definida a pergunta, deve-se elaborar o protocolo de pesquisa. Devem-se documentar os métodos para seleção de literatura, abrangendo critérios de exclusão e palavras-chave adotadas.

A revisão sistemática, amparada pela análise bibliométrica, teve três técnicas utilizadas: (I) análise temporal; (II) a recorrência dos países que mais publicaram, (III) as revistas que possuem artigos publicados e as respectivas áreas de conhecimento; Segundo Potter (2004), o objetivo de uma revisão sistemática é fornecer um panorama da produção científica, referente àquela área que se estuda, com critérios definidos de inclusão e exclusão, a fim de compreender o estado atual da arte, de maneira a sintetizar e avaliar a literatura sobre o tema. Ainda conforme Potter (2004), que em sua pesquisa utilizou os seguintes protocolos: (a) Formulação da questão de pesquisa; (b) Definição dos critérios de elegibilidade; (c) Seleção e acesso à literatura; (d) Avaliação da qualidade dos estudos incluídos; (e) Análise, síntese e divulgação dos resultados; a definição dessas informações pode obter uma melhor seleção dos artigos que irão compor o estudo.

Os Anexos A1 e A2 detalham as palavras-chave (strings de busca), os critérios de inclusão e exclusão, as bases de dados consultadas e as ferramentas empregadas no processo de seleção dos artigos. Desse processo, resultaram 19 trabalhos selecionados. A seguir, são expostos os resultados da análise bibliométrica. Os dados foram consolidados e apresentados em formato de gráficos.

Quanto à distribuição das publicações ao longo do tempo, a Figura 10 ilustra a frequência de artigos por ano.

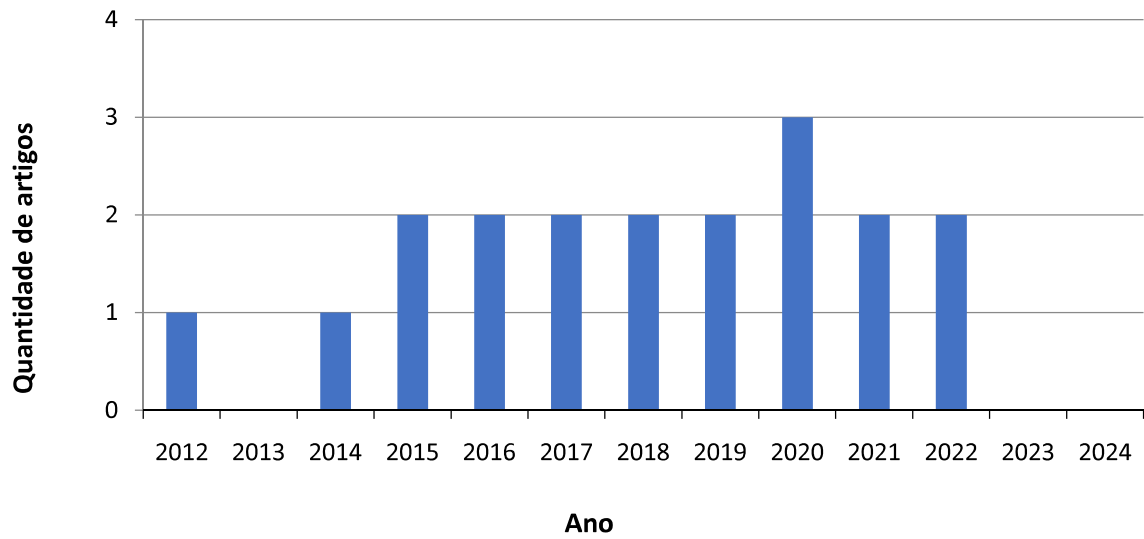


Figura 10 - Distribuição temporal dos trabalhos

A análise da distribuição temporal das publicações, ilustrada na Figura 10, revela um crescimento acentuado no número de artigos a partir de 2015. Esse volume de publicações se estabilizou em um novo patamar nos anos subsequentes.

Uma possível explicação para este fenômeno pode estar relacionada a marcos globais ocorridos em 2015. Naquele ano, a Conferência do Clima de Paris (COP21) resultou em um acordo climático histórico entre 195 países para limitar o aquecimento global (Comissão Europeia, 2015). Simultaneamente, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) foram estabelecidos pela Assembleia Geral das Nações Unidas (ISIE, 2017). Tais eventos indicam que as discussões sobre sustentabilidade têm ganhado relevância progressiva, o que pode ter impulsionado o interesse acadêmico no tema.

Prosseguindo com a análise, a Figura 11 apresenta a distribuição geográfica dos primeiros autores de cada artigo.

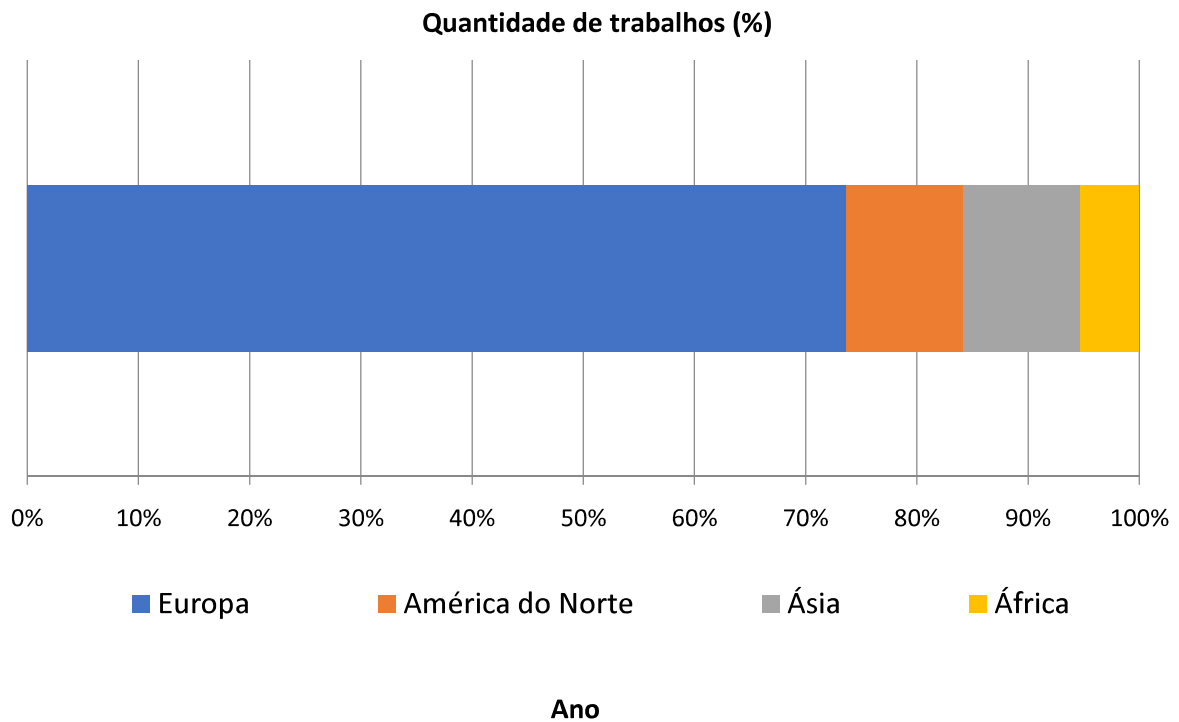


Figura 11 – Origem do país da instituição dos primeiros autores.

A análise da afiliação institucional dos primeiros autores (Figura 11) revela uma concentração expressiva de publicações na Europa, correspondendo a mais de 70% do total. O continente é liderado pelo Reino Unido, seguido pela Eslovênia.

É possível verificar que não houve nenhuma publicação sobre o tema nos países latino-americanos, até a data. Segundo Ofori (2019), esses continentes enfrentaram, em geral, nos últimos anos, pouca atividade industrial e econômica, levando a baixos rendimentos e a baixos padrões de vida à população. O autor acrescenta que, com isso, o campo da construção nos países em desenvolvimento acaba refletindo esta baixa atividade econômica, o que acarreta poucos novos trabalhos ou poucos avanços no conhecimento, sendo essa uma possível explicação para a falta de estudos sobre sustentabilidade, relacionada a geossintéticos ou ACV, de maneira geral, nesses locais.

A seguir (Figura 12), foram apresentadas as revistas nas quais os artigos foram publicados.

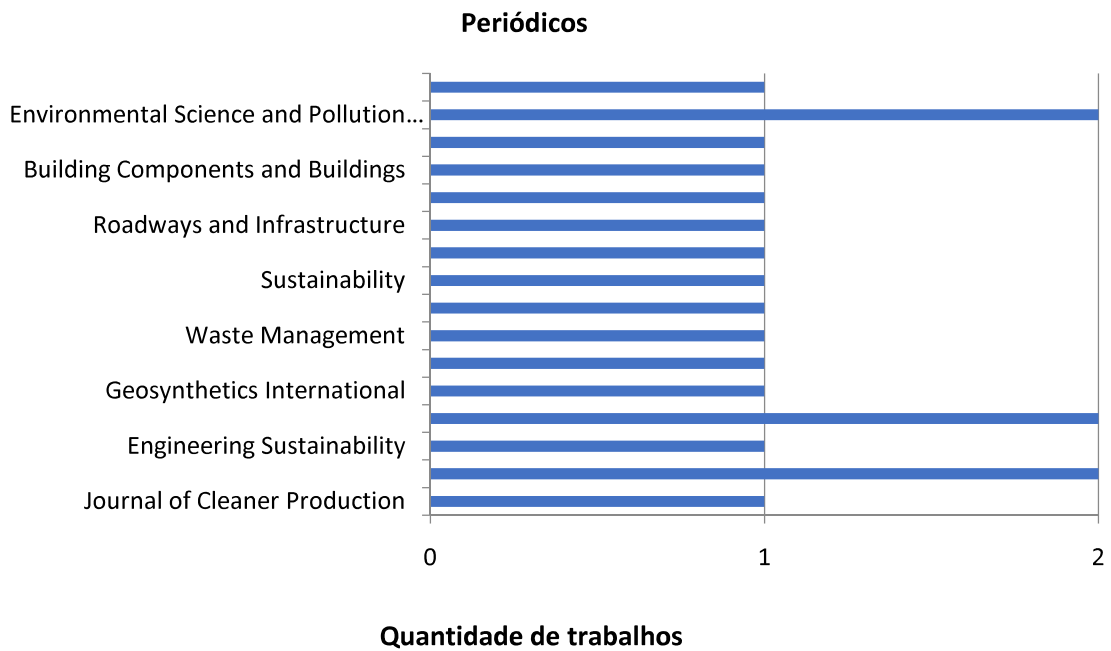


Figura 12 - Revista onde artigos foram publicados

Os resultados apresentados na Figura 12 indicam as revistas com maior número de publicações sobre o tema. Observa-se que três periódicos concentram a maior parte dos artigos: *Environmental Science and Pollution Research*, *Environmental Geotechnics* e *Geotextiles and Geomembranes*.

Destacam-se as revistas *Environmental Geotechnics* e *Geotextiles and Geomembranes*, pois são periódicos especializadas na área de geotecnia, o que reforça a relevância da pesquisa neste campo específico.

A Figura 13, por sua vez, classifica os tipos de estudos aplicados identificados na literatura revisada.

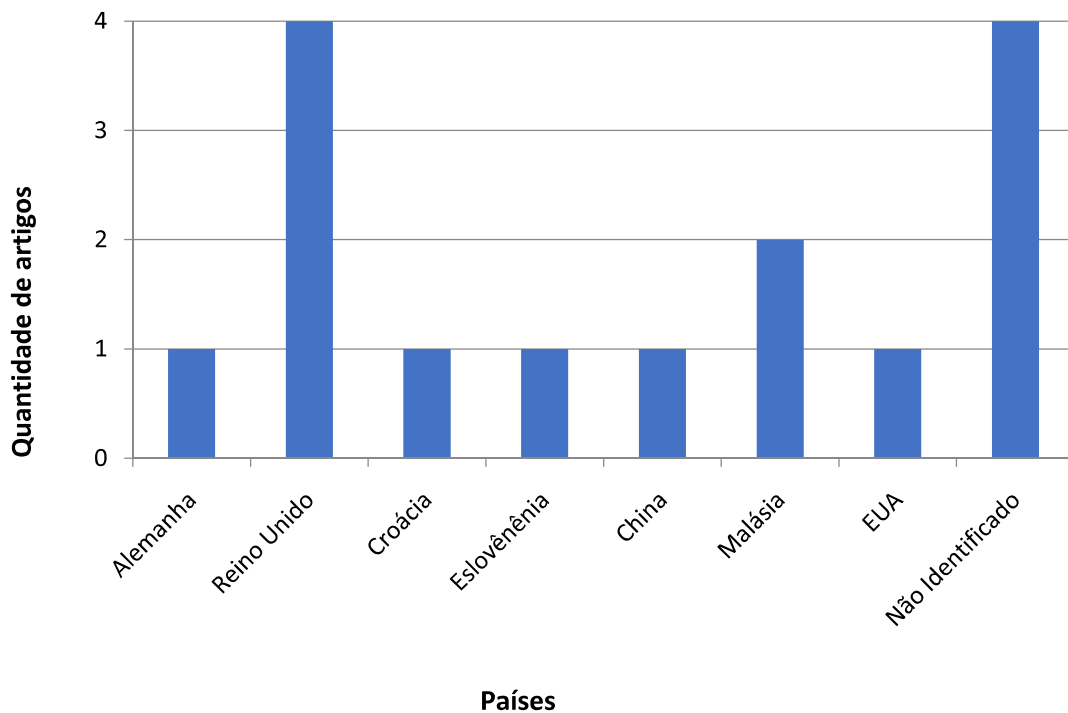


Figura 13 - Países que foram aplicados os estudos sobre o tema

A análise dos locais onde os estudos de caso foram realizados (Figura 13) aponta para uma concentração significativa no Reino Unido. Este dado sugere um maior foco na aplicação desta temática em países desenvolvidos.

Dando sequência à análise, com os resultados é possível compreender o sistema construtivo mais comum dentre os estudos selecionados. A Figura 14 especifica os tipos de obras nas quais geossintéticos foram avaliados por meio da Análise do Ciclo de Vida (ACV). Adicionalmente, a Figura 15 descreve os materiais específicos que foram empregados em cada um desses projetos.

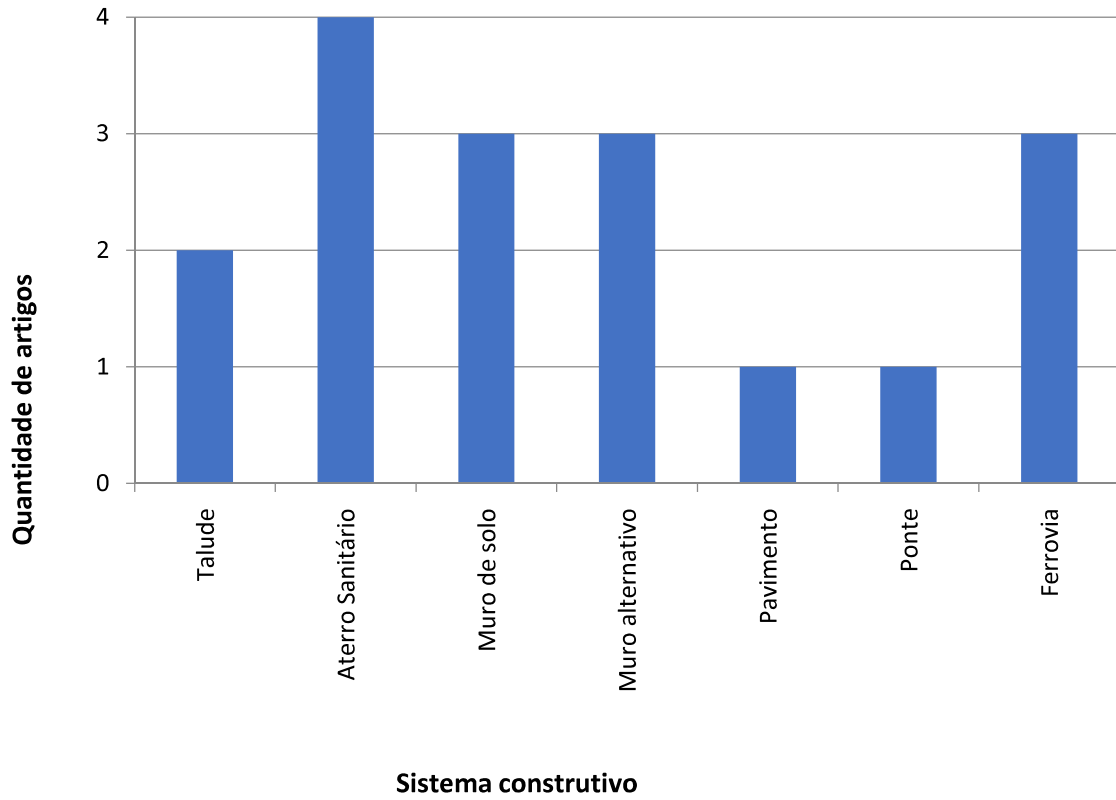


Figura 14 - Obra onde os geossintéticos foram aplicados

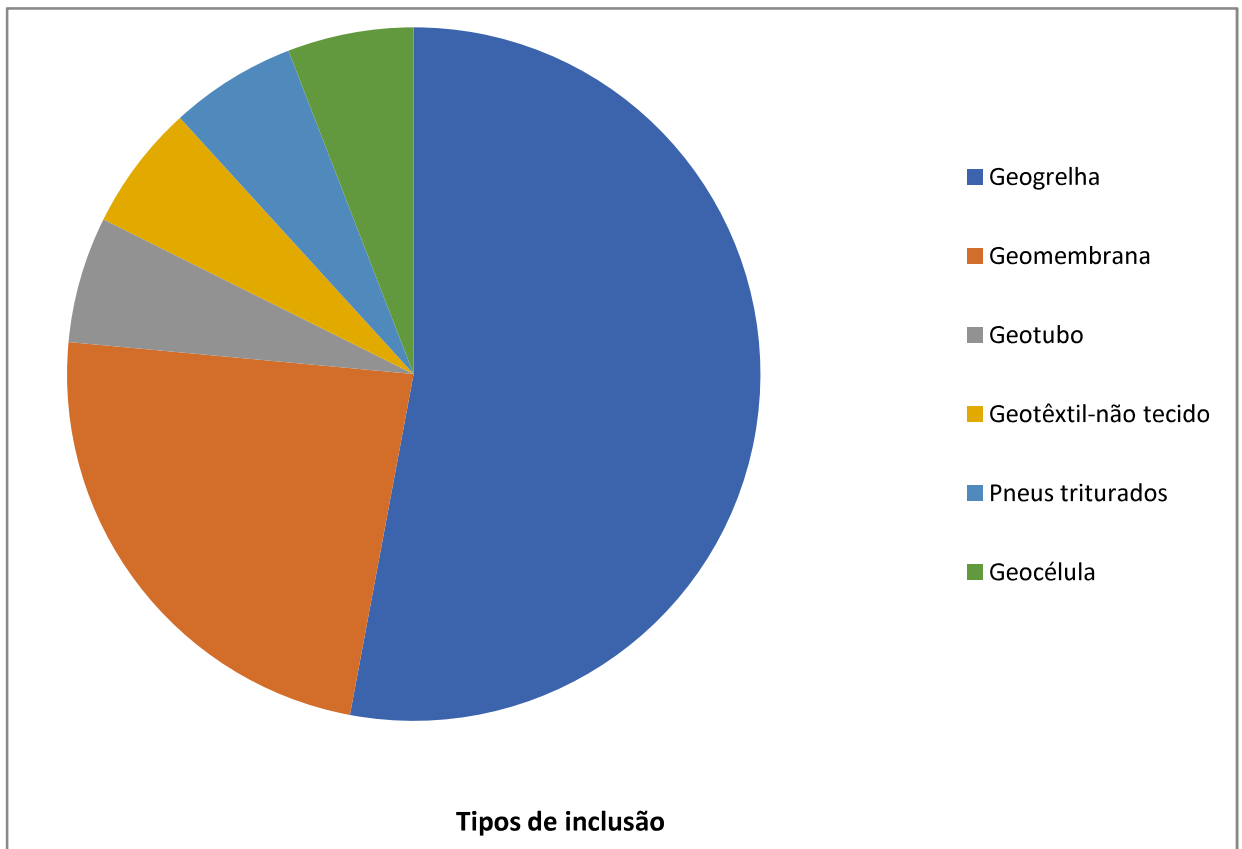


Figura 15 - Geossintéticos utilizados

As Figuras 14 e 15 indicam, respectivamente, as obras e os geossintéticos mais recorrentes nos estudos analisados. As aplicações mais frequentes ocorreram em projetos de aterros sanitários e ferrovias. Dentre os geossintéticos, a geogrelha foi o material de maior aplicação, seguida pela geomembrana.

Em suma, a análise bibliométrica e a revisão da literatura apontam para uma clara lacuna de conhecimento. Constatou-se a inexistência de trabalhos que apliquem a ACV em estruturas de solos reforçados com geossintéticos na América do Sul. Tal ausência de estudos reforça a relevância desta tese, que se propõe a preencher o referido hiato na pesquisa.

Dentre os trabalhos selecionados, os estudos sobre estruturas de solos reforçados representaram pouco mais de 15% do total. Além disso, essas pesquisas abordaram exclusivamente o uso de geogrelhas, o que indica a necessidade de analisar a aplicação de outros tipos de geossintéticos.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos artigos selecionados, detalhando seus principais atributos e resultados.

Tabela 2 - Trabalhos de ACV em geossintéticos e estrutura de solo reforçado.

Identificação do artigo	Referência	Ano	Local de aplicação do estudo	Método utilizado	Periódico que o artigo foi publicado	Local de trabalho dos primeiros autores	Fronteira do Sistema	Unidade Funcional	Programa Utilizado	Geossintético empregado	Tipo de obra onde o geossintético foi aplicado
1	Heerten	2012	Alemanha	N. I.	Geotextiles and Geomembranes	Alemanha (Europa)	Da extração matéria de prima à execução da obra	1 kg, 1 m <sup>2</sup> e 1 m <sup>3</sup>	N. I.	Geogrelha	Taludes
2	Raja <i>et al.</i>	2014	Reino Unido	N. I.	Engineering Sustainability	Reino Unido (Europa)	Da extração da matéria prima até a destinação final	1 m <sup>2</sup>	N. I.	Geomembrana revestida com geotêxtil	Aterro sanitário
3	Damians <i>et al.</i>	2015	N. I.	ReCiPe 2008	Environmental Geotechnics	Espanha (Europa)	Da extração dos materiais à execução da obra	1 m	SimaPro 8.0.2	Geogrelha	Muro de solo reforçado
4	Raja <i>et al.</i>	2015	Reino Unido	N. I.	Geosynthetics International	Reino Unido (Europa)	Da extração até fabricação	1 kg	N. I.	Geogrelha e geotêxtil não tecido	N. I.
5	Damians <i>et al.</i>	2016	N. I.	ReCiPe 2008	Environmental Geotechnics	Espanha (Europa)	Do berço à execução da obra	1 m	SimaPro 8.0.2	Geogrelha	Muro de solo reforçado
6	Bizjak <i>et al.</i>	2016	Croácia	CML 2001	Structure And Infrastructure Engineering	Eslovênia (Europa)	Da produção até o descarte	1 m <sup>2</sup>	N. I.	Geogrelha	Zona de transição das camadas inferiores de uma ferrovia
7	Turner <i>et al.</i>	2017	Reino Unido	N. I.	Waste Management	Reino Unido (Europa)	Execução da Obra	10.000 m <sup>2</sup>	N. I.	Geomembrana	Aterro sanitário
8	Umer <i>et al.</i>	2017	N. I.	N. I.	Transportation Research Part D	Canadá (América do Norte)	Uso do pavimento	1 m <sup>2</sup>	Athena Impact Estimator	Geotêxtil não-tecido	Camadas inferiores do pavimento

Tabela 2 - Trabalhos de ACV em geossintéticos e estrutura de solo reforçado (Continuação).

Identificação do artigo	Referência	Ano	Local de aplicação do estudo	Método utilizado	Periódico que o artigo foi publicado	Local de trabalho dos primeiros autores	Fronteiras do sistema	Unidade Funcional	Programa Utilizado	Geossintético utilizado	Tipo de obra onde o geossintético foi aplicado
9	Umer <i>et al.</i>	2017	N. I.	N. I.	Transportation Research Part D	Canadá (América do Norte)	Uso do pavimento	1 m <sup>2</sup>	Athena Impact Estimator	Geotêxtil não-tecido	Camadas inferiores do pavimento
10	Bizjak e Lenart	2018	Eslovênia	CML 2001	Geotextiles and Geomembranes	Eslovênia (Europa)	Da produção da matéria prima até o descarte	1 Kg e 1 m <sup>2</sup>	N. I.	Geogrelha	Pilares de uma ponte
11	Kaewunruen e Martín	2018	N. I.	N. I.	Sustainability	Reino Unido (Europa)	Uso de uma ferrovia	100 m	N. I.	Geogrelha	Camadas inferiores de uma ferrovia
12	Zhang <i>et al.</i>	2019	China	N. I.	Advances in Civil Engineering	China (Ásia)	Da produção a construção	100 m, 8 m, e 24 m,	N. I.	Geogrelha	Aterro

Legenda: N. I. – Não Informado

Tabela 3 - Trabalhos de ACV em geossintéticos e estrutura de solo reforçado (Continuação).

13	Djadouni <i>et al.</i>	2019	N. I.	N. I.	Roadwaysand Infrastructure	Portugal (Europa)	Da extração da matéria prima a execução da obra	30,4 m	Athena Impact Estimator	Pnues triturados	Muros de contenção
<b>Identificação do artigo</b>	<b>Referência</b>	<b>Ano</b>	<b>Local de aplicação do estufo</b>	<b>Método utilizado</b>	<b>Periódico que o artigo publicado foi</b>	<b>Local de trabalho dos primeiros autores</b>	<b>Fronteiras do sistema</b>	<b>Unidade Funcional</b>	<b>Programa Utilizado</b>	<b>Geossintético utilizado</b>	<b>Tipo de obra onde geossintético foi aplicado</b>
14	Leal <i>et al.</i>	2020	Reino Unido	N. I.	Transportation Geotechnics	Reino Unido (Europa)	Da aquisição da matéria prima a execução da obra	1 m <sup>2</sup>	Excel	N. I.	Talude
15	Balasbaneh e Marsono	2020	Malásia	ReCiPe 2016	Building Componentsand Buildings	Malásia (Europa)	Da extração até o destino final	1 m	SimaPro 8.0.2	N. I.	Muros de contenção
16	Madon <i>et al.</i>	2020			MethodsX	Eslovênia (Europa)				Geomembrana	
17	Balasbaneh <i>et al.</i>	2021	Malásia	ReCiPe 2016 e CML 2001	Environmental Science and Pollution Research	Malásia (Europa)	Da extração até o destino final	1 m	SimaPro 8.0.2	N. I.	Muros de contenção
18	Tariq <i>et al.</i>	2021	EUA	EPA TRACI	Environmental Science and Pollution Research	EUA (América do Norte)	N. I.	N. I.	SimaPro	Geomembrana	Aterro

Tabela 3 - Trabalhos de ACV em geossintéticos e estrutura de solo reforçado (Continuação).

19	SuresheChawla	2022	N. I.	IMPACT 2002	The International Journal of Life Cycle Assessment	India (Asia)	Da extração dos materiais até a execução da obra	1 km comprimento, 8,65 m de largura e 0,45 m de espessura	N. I.	Geocélula	Nas camadas de base de uma ferrovia
----	---------------	------	-------	----------------	--	--------------	--	--	-------	-----------	---

Legenda: N. I. – Não Informado.

A seguir são apresentados, com maiores de detalhes, os artigos descritos na Tabela 2. Além de descrever quais foram os focos do trabalho, foram descritas suas conclusões, quais foram as limitações desses trabalhos e também sobre a circularidade desses materiais (Tabela 3).

No estudo proposto por Heerten (2012), a comparação entre um sistema de proteção de taludes com geogrelhas incluindo um sistema de proteção vegetativa e um muro de contenção vertical de gravidade construído em concreto armado, mostrou resultados, consideravelmente, melhores para a solução de geossintéticos em relação à solução tradicional, tanto para demanda de energia acumulada (CED - Cumulated Energy Demand) e para as emissões de CO<sub>2</sub>. Os resultados mostraram cerca de 3,5 vezes menos para a CED e cerca de 5,4 vezes menos emissão para o CO<sub>2</sub> para a solução em geogrelha. Neste mesmo estudo, o autor estudou a aplicação de geogrelhas em camadas inferiores de estradas quando comparadas com alternativas com cimento e cal, obtendo 5,4 vezes menos CED e cerca de 27 vezes menos emissão de CO<sub>2</sub> da alternativa geogrelha. Uma limitação deste trabalho foi que o estudo não apresenta um estudo completo de ACV, além de não apresentar análises de circularidade dos materiais. As principais conclusões da pesquisa mostraram que as alternativas geossintéticas têm um impacto ambiental menor devido a menores emissões de CO<sub>2</sub>.

No trabalho de Raja *et al.* (2014) foi descrito um estudo de caso de um aterro que comparou as emissões de dióxido de carbono, quando executada com argila compactada e quando empregada com geossintéticos. Os limites de análise do ciclo de vida definidos para o estudo de caso foram do berço ao fim da construção, e incluiu todos os processos desde o fornecimento de materiais até o descarte dos materiais da construção. Os dados para a realização do estudo foram fornecidos pelos construtores e fabricantes, sendo usados para calcular a pegada de carbono de cada solução. A comparação mostrou que a solução com geossintético foi a mais sustentável. Apesar desse estudo não ser de uma Estrutura de Solo Reforçado, pois é de um aterro, ele contribuiu para se entender qual foi a diminuição do potencial das estruturas com geossintéticos em relação a apenas com argila.

O estudo proposto por Damians *et al.* (2015) apresentou uma aplicação comparativa entre duas soluções em concreto e duas alternativas de muros estabilizados mecanicamente. Os autores observaram menores impactos para os sistemas de construção de solos em comparação com as soluções tradicionais em concreto com as mesmas alturas e à medida que

as alturas aumentaram os potenciais impactos também aumentaram. Quando a comparação foi entre as estruturas de solos, a que menos causou impacto foi a alternativa executada com geogrelha em comparação com a alternativa em terra armada, no entanto, Damians *et al.* (2015) ressaltaram que esses impactos foram significativamente menores em comparação com as alternativas clássicas. Esse estudo apresentou importantes contribuições para o presente estudo, pois mostrou quantitativamente e qualitativamente os potenciais de impactos menores das estruturas de solos em relação às estruturas tradicionais, mostrando que as estruturas de solos têm uma diminuição entre 30% e 50%. As limitações residem no fato de que o trabalho não apresentou dados sobre circularidade dos materiais e não apresentou um estudo completo de ACV.

Raja *et al.* (2015), realizaram um estudo comparativo de carbono incorporado para geossintéticos tecidos e geogrelhas. O sistema de produto definido pelos autores foi do berço até à fabricação do produto. Os dados utilizados pelos autores foram obtidos diretamente dos fabricantes dos geossintéticos e mostraram poucas diferenças em relação aos valores dos bancos de dados. Os autores ressaltaram que existe falta de dados de carbono incorporado de geossintéticos na literatura para uso em projetos de construção. Os mesmos autores ainda completaram que, há necessidade de desenvolver, adicionar e estender este conjunto de dados para uma série de outras categorias de geossintéticos. E que a disponibilidade dos dados permitiriam a produção de um inventário e extensão desses dados de carbono incorporado dos geossintéticos a um alcance bem maior. As limitações deste trabalho foram que o estudo não apresentou uma ACV completa.

Outro trabalho realizado por Damians *et al.*, (2016), descreveu uma avaliação de sustentabilidade, mostrando um exemplo de como selecionar a opção mais sustentável entre soluções convencionais de parede de gravidade em concreto e as soluções de solo estabilizado com geogrelha, sendo tanto as estruturas em concreto quanto as estruturas de solos estabilizados com fitas metálicas e geossintéticos, foram modeladas para diferentes alturas. Os autores propuseram a análise de diferentes cenários, no que diz respeito aos três pilares da sustentabilidade. Quando a análise foi baseada na questão ambiental, as estruturas de solos foram as melhores soluções para todas as alturas dos muros para ambas as soluções, de terra armada e geogrelha. Já quando a análise teve o viés para o pilar econômico, as estruturas em concreto tiveram vantagem para as menores alturas com 3 metros. Essa pesquisa é uma continuação de um estudo realizado pelos mesmos autores (Damians *et al.*, 2015) e realiza

uma contribuição ao analisar os outros pilares sociais e econômicos da sustentabilidade, além do ambiental.

O objetivo do trabalho dos autores Bizjak *et al.* (2016) foi comparar dois diferentes tipos de métodos de renovação de vias para zonas de transição ferroviária. Na primeira situação, foi executada com uma alternativa tradicional de estabilização com cimento, enquanto a segunda solução faz uso de um geocompósito ancorado por aço. Os resultados da ACV realizada mostraram que, no caso de renovação de via para zonas de transição por meio de um geocompósito sustentado com aço, o impacto ambiental é menor do que quando foi realizada com estabilização de cimento. Os autores ressaltaram que serviços de escavação menores e, portanto, com quantidades menores de material, podem ser um dos motivos para causar menores potenciais impactos ambientais da alternativa com geocompósito. As limitações deste trabalho são que este trabalho não é sobre estruturas de solos reforçados com geossintéticos, apesar de contribuir comparando uma estrutura tradicional com uma estrutura com geossintéticos. Outra limitação é que os autores não realizaram um estudo completo de ACV.

O propósito do estudo realizado por Turner *et al.* (2017), foi avaliar os potenciais impactos das emissões de lixiviados de aterros sanitários, operados com diferentes estratégias, levando em conta os efeitos de potenciais da perda de controle. O público principal incluiu operadores de aterros e reguladores de resíduos no Reino Unido e no exterior, bem como os interessados em ACV. A unidade funcional foi definida como a quantidade total de lixiviado gerado ao longo de um horizonte de tempo de 10.000 anos a partir de um aterro sanitário concluído, em um local com uma superfície de 10.000 m<sup>2</sup> e uma profundidade de 20 m, preenchido com Resíduos Sólidos não perigosos. Os processos incluídos no sistema avaliado compreendem a geração, movimentação, e coleta de chorume no local, além do tratamento de lixiviado coletado. Os autores puderam mostrar que, a aplicação da ACV pôde ajudar os operadores de aterros a identificar oportunidades, para reduzir os impactos ambientais de seus aterros sanitários, melhorando a eficiência do tratamento dos principais contaminantes. As limitações foram que o trabalho não é sobre estruturas de solos reforçadas com geossintéticos e não foram apresentados estudos sobre circularidade dos materiais.

O trabalho de Umer *et al.* (2017), foi desenvolvido para avaliação de sustentabilidade de diferentes alternativas de pavimento com base em uma análise econômica e ambiental. A pesquisa pôde avaliar, efetivamente, diferentes tecnologias de pavimentos, incluindo os flexíveis, os de concretos, os com geossintéticos e suas combinações sob diferentes

características e condições de tráfego. Os resultados do estudo indicaram que os pavimentos com geossintéticos podem ser usados para aumentar a vida útil do pavimento para estradas de baixo volume, com custo otimizado e com impactos ambientais mínimos. Os autores enfatizaram, que o trabalho pode auxiliar os tomadores de decisão, a optar entre a solução com menores impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida. As limitações desta pesquisa foram que os dados apresentados se referem a pavimentos.

Bizjak e Lenart (2018) apresentaram um estudo de caso de uma ponte construída no ano de 2014. O objetivo da pesquisa foi comparar dois tipos diferentes de pontes: o novo sistema de ponte, que é composto por uma viga simples parcialmente executada com geossintéticos nos pilares da estrutura e outra executada por um sistema convencional em concreto. Os resultados da avaliação do ciclo de vida ambiental mostraram que o sistema de ponte executada parcialmente com geossintéticos tem menores impactos ambientais quando comparadas à ponte convencionalmente construída em concreto armado. As principais contribuições deste estudo foram em apresentar as diferenças quantitativas e qualitativas do potencial de impacto por categoria entre a ponte convencional e com geossintéticos. As limitações deste trabalho foram que o trabalho é aplicado a pontes e não a estruturas de solos reforçados.

Kaewunruen e Martin (2018) objetivaram avaliar os procedimentos de mitigação de ruídos e eficácia na indústria ferroviária ao longo de seu ciclo de vida. A ênfase deste estudo foi colocada em novos procedimentos para mitigação de ruído e vibração, incluindo metamateriais, geossintéticos e melhorias do solo. Para comparar todos esses procedimentos foram realizadas suposições de bases idênticas. A vida útil deste estudo foi adotada para 50 anos, pois os autores entenderam que este período era relevante para o estudo. Neste estudo Kaewunruen e Martin (2018), destacaram que o clima adverso desempenhou um papel significativo em todas as técnicas. No entanto, verificaram que os procedimentos sustentáveis, foram menos sensíveis a climas extremos e que estes procedimentos estavam associados com as aplicações de materiais geossintéticos, que foram as geogrelhas. As principais contribuições deste trabalho foram apresentar as diferenças ambientais das situações aplicadas mostrando que quando aplicadas combinadas com geossintéticos podem apresentar ganhos ambientais. As limitações foram que a ACV não aplicaram em estruturas de solos reforçados e seus parâmetros foram aplicados para a realidade do Japão e quando reaplicados em outro país, podem não mostrar os mesmos valores.

Zhang *et al.* (2019) avaliaram duas técnicas de estabilização, a estabilização com cal e com reforço de geogrelha. Foi realizado um estudo de caso a fim de se analisar qual dessas técnicas foi a mais sustentável, o estudo contemplou os processos de produção até a construção do aterro. Através dos parâmetros de consumo de energia e emissões de dióxido de carbono foi realizada a avaliação do ciclo de vida (ACV). Zhang *et al.* (2019) puderam observar que o consumo de energia e as emissões de CO<sup>2</sup> podem ser reduzidos em 7,52% e 57,09%, respectivamente com uso da geogrelha para estabilização. Nos resultados das análises de cenários, os autores observaram que quando a altura do aterro é inferior a 10 m, a técnica obteve vantagens nos parâmetros de energia e redução de emissões. Ainda foi possível verificar que a solução com geogrelha não foi sensível às mudanças de distância de transporte e de tratamento, podendo reduzir significativamente os impactos ambientais, especialmente, na redução do impacto de mudanças climáticas. A principal contribuição desta pesquisa foi mostrar o potencial de redução da aplicação da geogrelha quando comparada com a cal para estabilização do talude de um aterro. Uma das limitações desta pesquisa foi que os pesquisadores não apresentaram um estudo completo de ACV.

Djadouni *et al.* (2019) aplicaram a metodologia de ACV para comparar o consumo de energia, emissões de gases de efeito estufa e danos para dois sistemas de estruturas de contenção, um método tradicional, envolvendo um muro de contenção em concreto e um método alternativo, envolvendo um muro de contenção preenchido com pneus triturados. As fronteiras do estudo compreenderam da extração dos materiais até a execução da obra. Os resultados mostraram que para todas as categorias de impacto, houve uma redução significativa com o uso de pneus triturados. As justificativas para o ganho ambiental foram que devido à diminuição das quantidades de concreto, aço de reforço e quantidade de combustível consumido pelas máquinas de construção e veículos que transportaram materiais de construção, mostrando que os muros de contenção com pneus triturados foi uma solução mais sustentável em comparação com a solução tradicional. A principal contribuição deste trabalho foi demonstrar que soluções alternativas podem ter menores potenciais de impactos ambientais em comparação com soluções com concreto armado. As limitações deste trabalho foram que o trabalho não realizou ACV completa e também que o estudo não foi sobre geossintéticos.

Leal *et al.* (2020) propuseram avaliar o desempenho ambiental de técnicas corretivas inovadoras e convencionais para reparar falhas em taludes de rodovias planas. Os sistemas de estabilização de taludes sob avaliação incluíram: substituição de enrocamento granular,

plântio de salgueiro vivo, solo reforçado com fibra e geossintéticos. Os resultados indicaram que a técnica menos impactante foi o plântio de salgueiro, seguido de perto pelos geossintéticos eletrocinéticos. Além disso, os autores destacaram que o transporte de materiais e equipamentos foi o fluxo com maior contribuição das emissões de dióxido de carbono. A principal contribuição deste trabalho foi demonstrar os ganhos ambientais que as soluções alternativas podem apresentar. As limitações foram que o estudo não contemplou aplicação da ACV por completo.

O objetivo da pesquisa de Balasbaneh e Marsono (2020) foi avaliar parâmetros de sustentabilidade, de custo e ACV social de diferentes estruturas de contenção na Malásia. As estruturas foram de: concreto em gravidade, concreto armado, muro gabião e de resíduos de alvenaria. Quatro critérios diferentes foram avaliados, como: potencial de aquecimento global, a destruição da camada de ozônio, valor presente de custo e os impactos sociais. A metodologia de ACV foi aplicada, a fim de se conhecer quais foram as estruturas com menores potenciais de impacto. Os resultados observados pelos autores mostraram que as o muro de gabião e o de alvenaria de entulho foram as alternativas mais sustentáveis, respectivamente. A principal contribuição deste trabalho foi mostrar que outras soluções podem apresentar ganhos ambientais em comparação com as estruturas tradicionais. A principal limitação deste estudo foi que os autores não incluíram estruturas de solos reforçados com geossintéticos no estudo. Além, de segundo os autores o estudo pode ser replicado em locais com clima semelhante ao local de aplicação do estudo. Portanto, se aplicados em locais diferente da Malásia, podem não apresentar os mesmos resultados.

Balasbaneh *et al.* (2021) avaliaram muros de gravidade, sendo esta a mais comuns em termos de impactos ambientais, questões econômicas e a combinação desses dois parâmetros. Os muros de gravidade observados neste estudo consistiram em gabião, em e em blocos de alvenaria, além de uma estrutura em concreto armado. Para atingir o objetivo deste estudo, a metodologia ACV no âmbito ambiental e de custos foi realizada. Os resultados mostraram que a opção mais sustentável, entre todas as alternativas, foi a estrutura de gabião, seguida pela estrutura de escombros de Alvenaria. No entanto, em termos de aspectos econômicos, a estrutura em concreto foi a melhor opção, custando cerca de 17% menos que o Muro de Gabião. A principal contribuição deste foi a realização de um estudo completo de estruturas de contenções de solos. As limitações foram que, não foram contempladas no estudo as estruturas de solos reforçados com geossintéticos.

Tariq *et al.* (2021) realizaram um estudo comparativo das técnicas arbusto de salgueiro com evapotranspiração, argila convencional e cobertura com geossintéticos através da metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV). Os autores afirmaram que a vegetação possui a capacidade de armazenar carbono em suas raízes grossas, criando a oportunidade para absorver as emissões de carbono. Tariq *et al.* (2021) destacaram que a técnica foi capaz de diminuir em 4,7 vezes os potenciais de impacto em relação à cobertura argilosa e 7,7 vezes menos que a cobertura com geossintéticos. As análises de cenários e incerteza indicaram que a cobertura com geossintéticos, pôde proteger a saúde humana e o meio ambiente, reduzindo as emissões de gases causadoras das mudanças climáticas e captando o carbono, além de fornecer uma fonte de excedentes de madeira, que podem ser usados para energia renovável ou outras aplicações. A principal contribuição deste trabalho foi mostrar que em algumas aplicações, a solução geossintética pode não ser a com menor potencial de impacto. As limitações deste trabalho foram que neste não foram realizadas aplicações em estruturas de solos reforçados com geossintéticos, além de seus dados representarem o contexto local.

Suresh e Chawla (2022) estudaram os impactos ambientais de agregados processados de uma mina de carvão comparando com os agregados do material abaixo do nível do terreno natural. O estudo também investigou a sustentabilidade ambiental do uso de geocélulas nas camadas abaixo do terreno natural. O método de avaliação de impacto adotado foi o IMPACT 2002, com análise de quinze categorias de impactos midpoint e quatro de endpoint. Os resultados mostraram que os agregados naturais quando comparados com agregados virgens, apresentaram uma redução de 35% na categoria de mudanças climáticas, além de uma redução de 33% na demanda por energia não renovável. Além disso, a produção dos agregados reforçados com geocélula reduziu o potencial de mudança climática em 16%. A principal contribuição deste artigo foi mostrar que os geossintéticos podem ser capazes de reduzir os potenciais impactos ambientais.

Morsy e Thakeb (2022) realizaram uma pesquisa aplicando a metodologia ACV em cinco estruturas de contenção de solos: muro de gravidade, estrutura tradicional em concreto armado, muros de tijolos, muros de gabião e estrutura de solos reforçada com geossintético. O estudo teve como fronteiras da fabricação à destinação final (do berço ao túmulo). Este analisou as categorias de impacto através do método ReCiPe verificando em quais Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) ocorreu os maiores potenciais impactos e em quais estruturas. Os resultados mostraram que as estruturas de solos reforçadas com geogrelha contribuem para 10 dos 17 ODS da ONU. Os autores observaram que a construção dos muros

convencionais requer grandes quantidades de cimento/concreto, que emitem uma quantidade significativa de CO<sub>2</sub>. Em contraste, a construção de estrutura de solos reforçado com georelha requer consideravelmente menos concreto e mais solo para aterro. Os autores mostraram que a estrutura com maiores benefícios ambiental foi a de solos com geogrelha e foi decorrência do uso de solos como principal componente. A principal contribuição deste estudo para a presente pesquisa foi apresentar um estudo completo de ACV, mostrando quais das estruturas e quais categorias houve os maiores potenciais impactos. A limitação desta pesquisa foi que os autores não apresentaram questões relativas à circularidades dos materiais.

Todas as referências dos artigos descritos e que foram selecionados na RSL estão descritos no Anexo B, este Anexo contém as referências, o link de acesso de cada trabalho para facilitar a localização.

Vale destaque para outros trabalhos que ficaram fora do escopo da RSL desta pesquisa presente, que foram os trabalhos de Rafalko (2010) e Lee & Basu (2025), mas que contribuíram para a compreensão dos potenciais das estruturas de solos reforçadas com geossintéticos.

### 2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O REFERENCIAL TEÓRICO

Através do referencial teórico, foi possível observar a significativa influência da construção civil na economia e no meio ambiente. O setor, apesar de sua resiliência e grande capacidade de geração de empregos, é um dos maiores consumidores de recursos naturais e emissores de gases de efeito estufa. Diante disso, esta seção destaca a necessidade de incorporar a sustentabilidade nas práticas construtivas, apresentando a ACV e a EC como ferramentas essenciais para quantificar e mitigar os impactos ambientais, com foco especial na aplicação de geossintéticos em estruturas de solos reforçados como uma alternativa mais sustentável.

As principais conclusões reforçam que a metodologia de ACV é um instrumento eficaz para a gestão ambiental, permitindo a avaliação quantitativa dos potenciais impactos de um produto ou processo ao longo de todas as suas fases, desde a extração da matéria-prima até o descarte. Em paralelo, a EC é apresentada como um sistema regenerativo que busca eliminar o desperdício e manter materiais em seu máximo valor e utilidade, contrapondo-se ao modelo linear tradicional de "extrair, produzir e descartar". A aplicação desses conceitos na construção civil, um setor com alto consumo de materiais e geração de resíduos, é crucial para

promover o desenvolvimento sustentável e alcançar metas globais como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre a aplicação da ACV em estruturas reforçadas com geossintéticos revela um crescimento no interesse acadêmico pelo tema a partir de 2015, possivelmente impulsionado por marcos globais de sustentabilidade como a COP21 e os ODS. A análise bibliométrica demonstrou uma forte concentração de estudos na Europa, com mais de 70% das publicações, e identificou as geogrelhas como o geossintético mais estudado, principalmente em aplicações de aterros sanitários.

A conclusão mais significativa da RSL é a identificação de uma clara lacuna de conhecimento: a ausência de trabalhos que apliquem a ACV em estruturas de solos reforçados com geossintéticos na América do Sul. Diversos estudos de caso analisados indicam que as soluções com geossintéticos, quando comparadas a métodos tradicionais em concreto, apresentam menor impacto ambiental, com reduções significativas nas emissões de CO<sup>2</sup> e na demanda de energia. Essa constatação, somada à falta de pesquisas em contextos sul-americanos, reforça a de mais pesquisa na área.

### 3. MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

A pesquisa aqui apresentada caracteriza-se como sendo qualitativa e quantitativa, que utilizou as abordagens metodológicas descritivas e explicativas. A escolha da pesquisa qualitativa caracteriza-se por ser um método no qual se preocupa com o aprofundamento da compreensão dos dados coletados e analisados, enfatizando todo o seu processo; já a escolha da pesquisa quantitativa caracteriza-se por ser um método, que quantifica os dados coletados de forma objetiva por meio de experimentos e explicações estatísticas (Chizzotti, 2005).

As abordagens metodológicas descritiva e explicativa caracterizam-se por serem métodos nos quais é possível descrever, identificar, classificar, interpretar, analisar e comparar o objeto em estudo analisado, como também, pode-se utilizar o método experimental para procurar os fatores determinantes, aprofundando o conhecimento da realidade, procurando a razão e o porquê das coisas, além de outros aspectos (Alvez-Mazzotti & Gewandsznajder, 1998).

#### 3.1 ETAPAS DA PESQUISA

Os procedimentos metodológicos que subsidiaram o desenvolvimento da pesquisa estão apresentados, a seguir. Para tanto, a metodologia aqui apresentada foi realizada de acordo com as seguintes etapas:

- I – Realização da Revisão Sistemática da Literatura, conforme descrito no capítulo anterior;
- II – Apresentação das estruturas em que foi aplicada a ACV;
- III - Definição de objetivo e escopo da ACV comparativa;
- IV – Apresentação do Inventário de Ciclo de Vida da ACV comparativa;
- V – Interpretação da ACV comparativa;
- VI – Análise de Circularidade dos Principais Constituintes das Estruturas;
- VII – Análises dos cenários propostos;
- VIII - Discussão dos resultados e conclusões.

De maneira a auxiliar a compressão das etapas descritas, nesta seção de metodologia, foi elaborado um fluxograma, mostrando como as sequências das etapas e como elas se conectaram, de acordo com a Figura 16, a seguir.

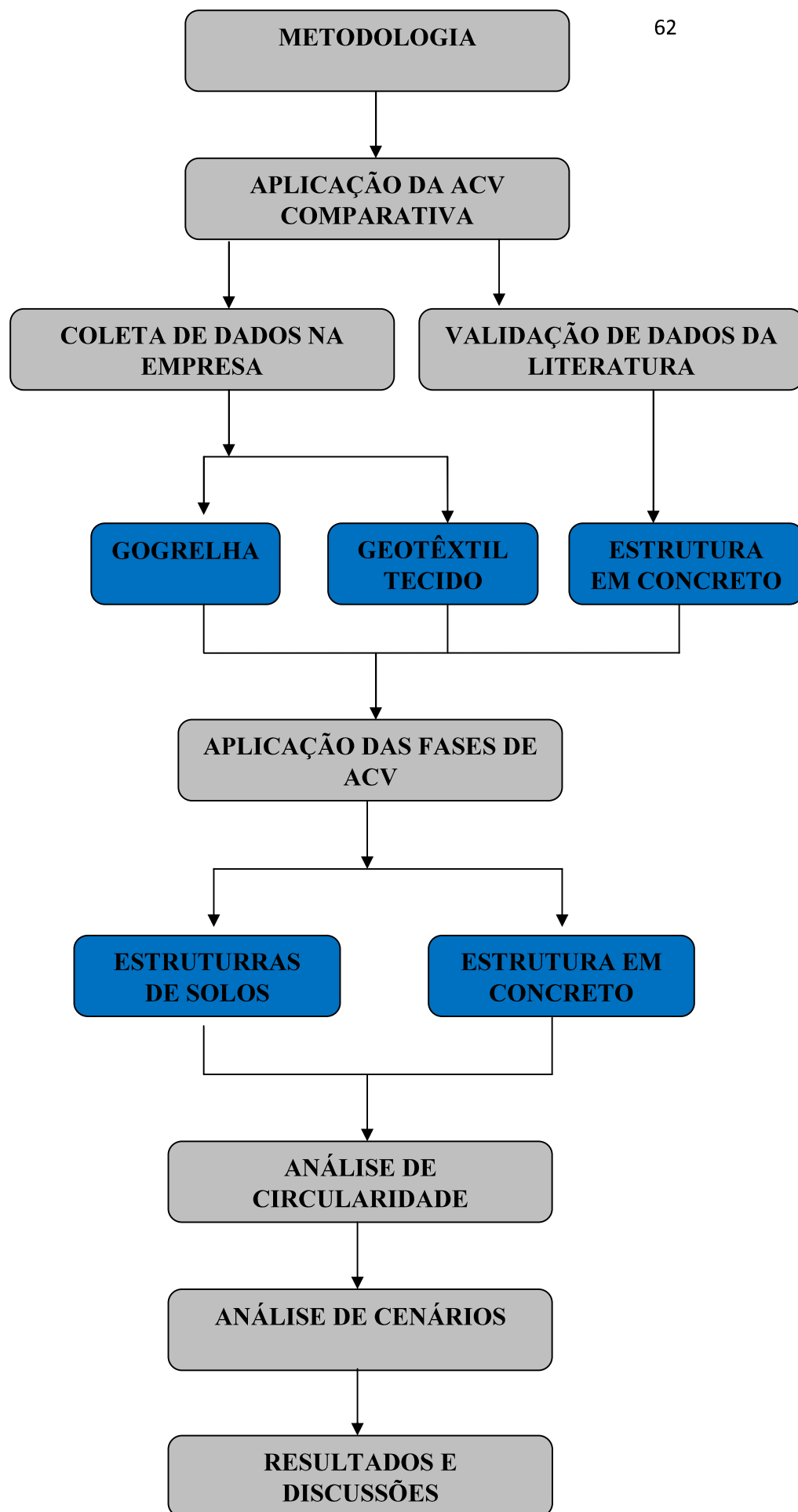


Figura 16 - Fluxograma das etapas das seções de metodologia.

Os procedimentos apresentados anteriormente foram descritos com mais detalhes a seguir.

### 3.1.1. Apresentação das estruturas em que foi aplicada a ACV.

A presente pesquisa teve como proposta a realização de uma aplicação comparativa da metodologia de ACV em diferentes estruturas de solos reforçados com geossintéticos e compará-las com uma estrutura tradicional, as seguintes estruturas foram estudadas:

- i. Estrutura de solos reforçados com geotêxtil tecido;
- ii. Estrutura de solos reforçados com geogrelha;
- iii. Estrutura de gravidade em concreto.

A aplicação da metodologia de ACV nas estruturas de contenção descrita acima teve como recomendações as estabelecidas pelas normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2025) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2014).

Para a realização do estudo foi necessária total equivalência referente à unidade funcional das estruturas comparadas, a fim de não ocorrer resultados inapropriados.

A ferramenta utilizada para tratar os dados de inventário foi o software OpenLCA. Todos os dados, primários e secundários, foram caracterizados pelo método ReCiPe (2016) e os resultados alcançados foram analisados, posteriormente tratados e transformados em gráficos, de forma a facilitar o entendimento da relevância dos potenciais impactos ambientais.

A escolha do software OpenLCA ocorreu por se tratar de um programa gratuito e que iria suprir todas as necessidades de outro programa, que fosse necessário obter uma licença. O aprendizado para utilizar a ferramenta ocorreu durante as disciplinas que o aluno participou, em que o OpenLCA foi apresentado e demonstrado sua operacionalização através de aulas práticas, como realizar análise qualitativa e quantitativa dos potenciais impactos do objeto em estudo.

O desenvolvimento da ACV, para as estruturas analisadas, fundamentou-se no cumprimento das exigências metodológicas da ABNT NBR ISO 14040 e 14044, compreendendo as seguintes fases:

- a) Definição de Objetivo e Escopo;
- b) Inventário de Ciclo de Vida (ICV);
- c) Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV);
- d) Interpretação.

## 3.2 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO

### 3.2.1 Objetivo da pesquisa.

A presente análise de ACV estabelece uma comparação entre diferentes tipologias de contenção, sendo duas estruturas de solos reforçados com geossintéticos e uma estrutura convencional em concreto, a fim de quantificar e qualificar os potenciais impactos ambientais de cada uma das estruturas.

Adicionalmente, analisou-se a circularidade dos principais constituintes das estruturas acima descritas. O estudo visa oferecer subsídios a projetistas, construtores e pesquisadores da área sobre os impactos e benefícios da implementação de medidas de EC, demonstrando os possíveis ganhos ambientais alcançáveis com a adoção de tais práticas.

### 3.2.2 Motivação para realização do estudo

Uma das razões fundamentais para se realizar esta pesquisa foi a necessidade de promover, principalmente, aos profissionais projetistas e construtores deste tipo de estrutura, subsídios científicos necessários para poderem optar entre as estruturas e materiais com menores potenciais impactos ambientais. Com a finalidade de poder executar projetos mais sustentáveis, levando em consideração todos os potenciais impactos ambientais, em todas as etapas do ciclo de vida da estrutura. Sendo assim, este trabalho poderá colaborar para tornar este setor da Engenharia Civil, uma área mais consciente e responsável.

### 3.2.3 Público-alvo

Esta pesquisa destina-se a um público diversificado, englobando tanto a

comunidade acadêmica quanto o setor produtivo. O conteúdo é direcionado a pesquisadores e profissionais das áreas de geotecnia, estruturas e análise de impactos ambientais, bem como a engenheiros, arquitetos, construtores e, fundamentalmente, aos clientes e investidores, bem como, a gestão pública (ator fundamental, pois é quem determina a aplicação e a regulamentação de soluções mais sustentáveis) e outros interessados na área da construção civil que buscam embasamento técnico para a tomada de decisão por soluções mais sustentáveis.

### 3.3 DEFINIÇÃO DE ESCOPO

#### 3.3.1 Tipos de entregas e aplicações pretendidas

A pesquisa foi desenvolvida como um estudo completo de Avaliação de Ciclo de Vida, analisando as etapas de: fabricação dos geossintéticos, execução das obras com geossintéticos, manutenção da estrutura e destino final dos materiais, a fim de avaliar o desempenho ambiental destes processos, abrangendo as fases de Inventário de Ciclo de Vida das estruturas a serem analisadas, bem como, a Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida a partir dos dados do inventário e Interpretação.

As aplicações pretendidas deste estudo objetivam dar suporte à tomada de decisão de profissionais das áreas de projetos e construtores, em especial, do setor de geotecnia e estruturas, podendo auxiliar nas escolhas de muros de contenção de solos e de seus materiais que podem ter menores potenciais impactos ambientais.

#### 3.3.2 Função e unidade funcional

A função a ser avaliada pelo estudo foi a contenção de deslizamento de solos através da construção de estrutura para este objetivo.

A durabilidade mínima prevista para estruturas tradicionais de contenção de solos em concreto é de 50 anos, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) e para as estruturas de solos reforçados com geossintéticos foi adotada a mesma vida útil.

A unidade funcional adotada foi de  $1,00 \text{ m}^3$  de estruturas de contenção solos com a durabilidade mínima de 50 anos, referente à cidade de São Carlos/SP, os dados climáticos estão descritos no Anexo C e são relativos ao de 2024.

A Tabela 3 descreve os parâmetros para as estruturas em relação aos Fatores de

Segurança:

Tabela 3 - Fatores de Segurança

<b>Verificação de segurança</b>	<b>Fator de segurança mínimo</b>
Tombamento	2,0
Deslizamento de base	1,5
Capacidade de carga da fundação	3,0

Fonte. ABNT NBR 11682 (2009).

Além disso, a estrutura de gravidade tradicional teve uma resistência de 30 MPa e as estruturas de solos obedeceram as seguintes prescrições para os geossintéticos (Tabela 4):

Tabela 4 - Prescrições dos geossintéticos utilizados nas estruturas

Geossintéticos	Massa por unidade de área (g/m <sup>2</sup> )	Resistência à tração longitudinal (kN/m)	Espessura nominal (m)
Geotêxtil Tecido	180	50	1,4 x 10 <sup>-3</sup>
Geogrelha	400	50	1,2 x 10 <sup>-3</sup>

Fonte: (Oliveira *et al.*, 2016).

Foram analisados os impactos ambientais da estrutura de gravidade em concreto (Figura 17) e das estruturas de solos reforçados (Figura 18), objetos deste estudo, de acordo com a unidade funcional acima descrita. Para a mesma estrutura em solo reforçado foram alternados apenas os geossintéticos (Figura 19), sendo utilizado o geotêxtil tecido e a geogrelha, as dimensões de ambas as estruturas foram apresentadas em metros e estão apresentadas, a seguir:

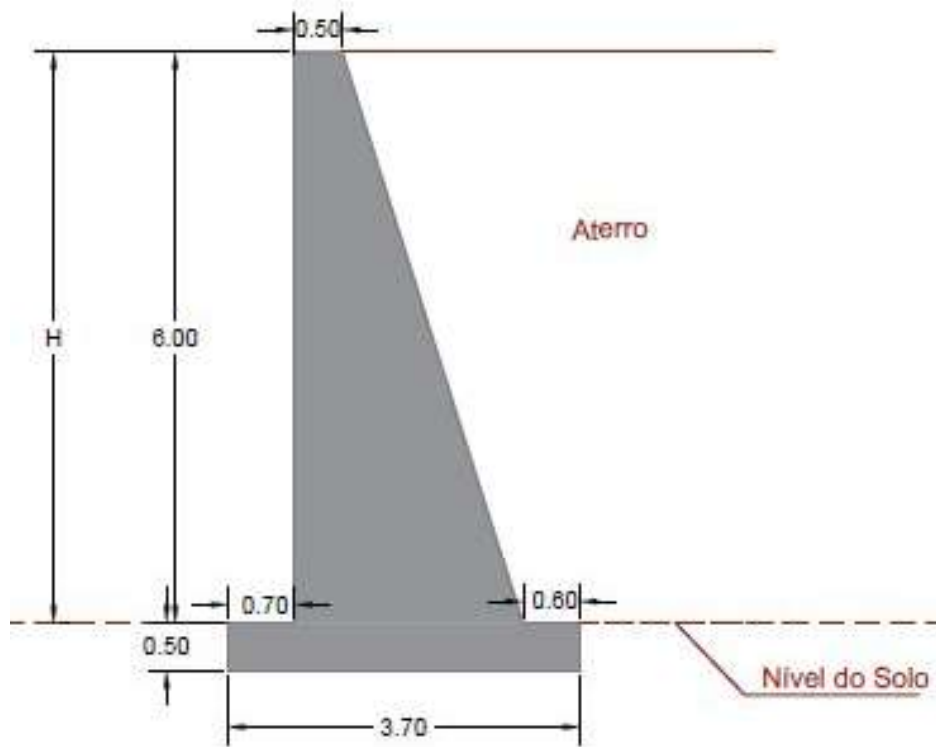


Figura 17 - Estrutura em concreto (Gravidade).

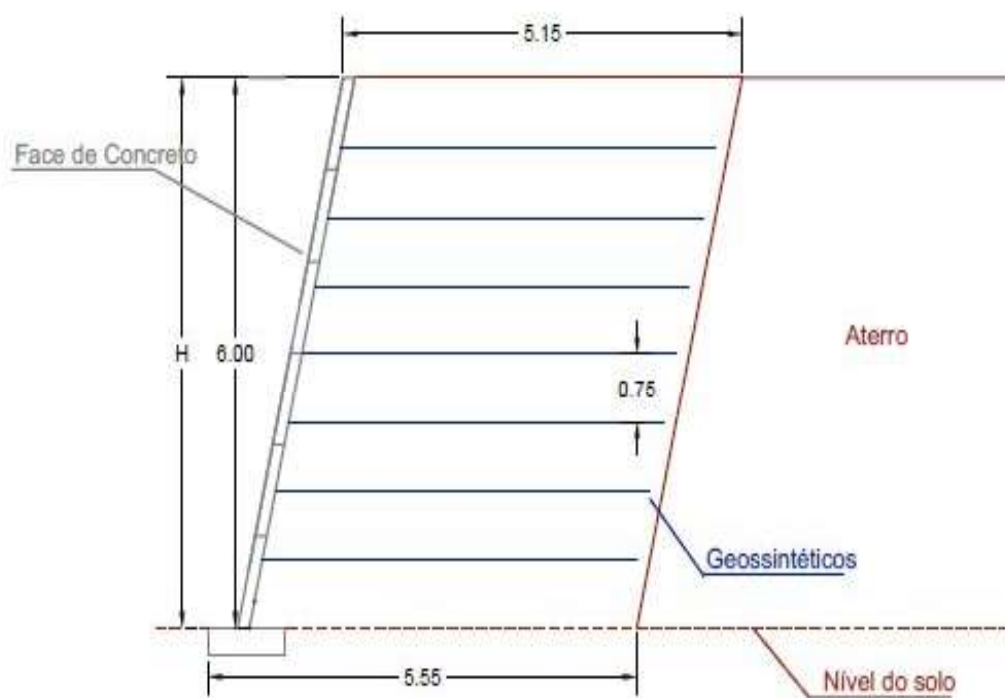


Figura 18 - Estrutura em solo reforçado com geossintéticos.

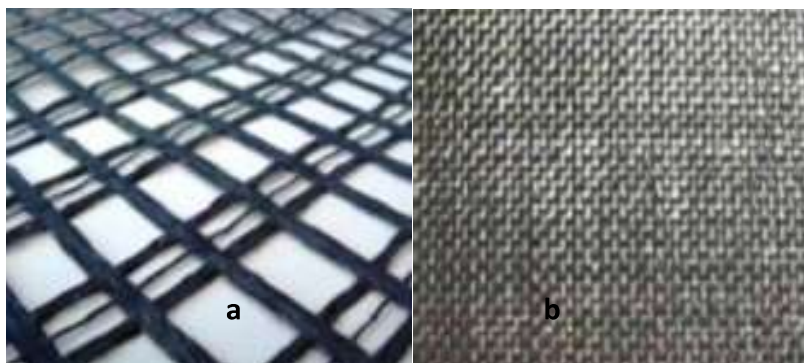


Figura 19 - Geossintéticos a serem analisados: a) Geogrelha; e b) Geotêxtil tecido. (Oliveira *et al.*, 2016).

### 3.3.3 Fronteiras do sistema

A seguir, estão descritas as fronteiras (sistema do produto) das três estruturas analisadas (Figura 20).

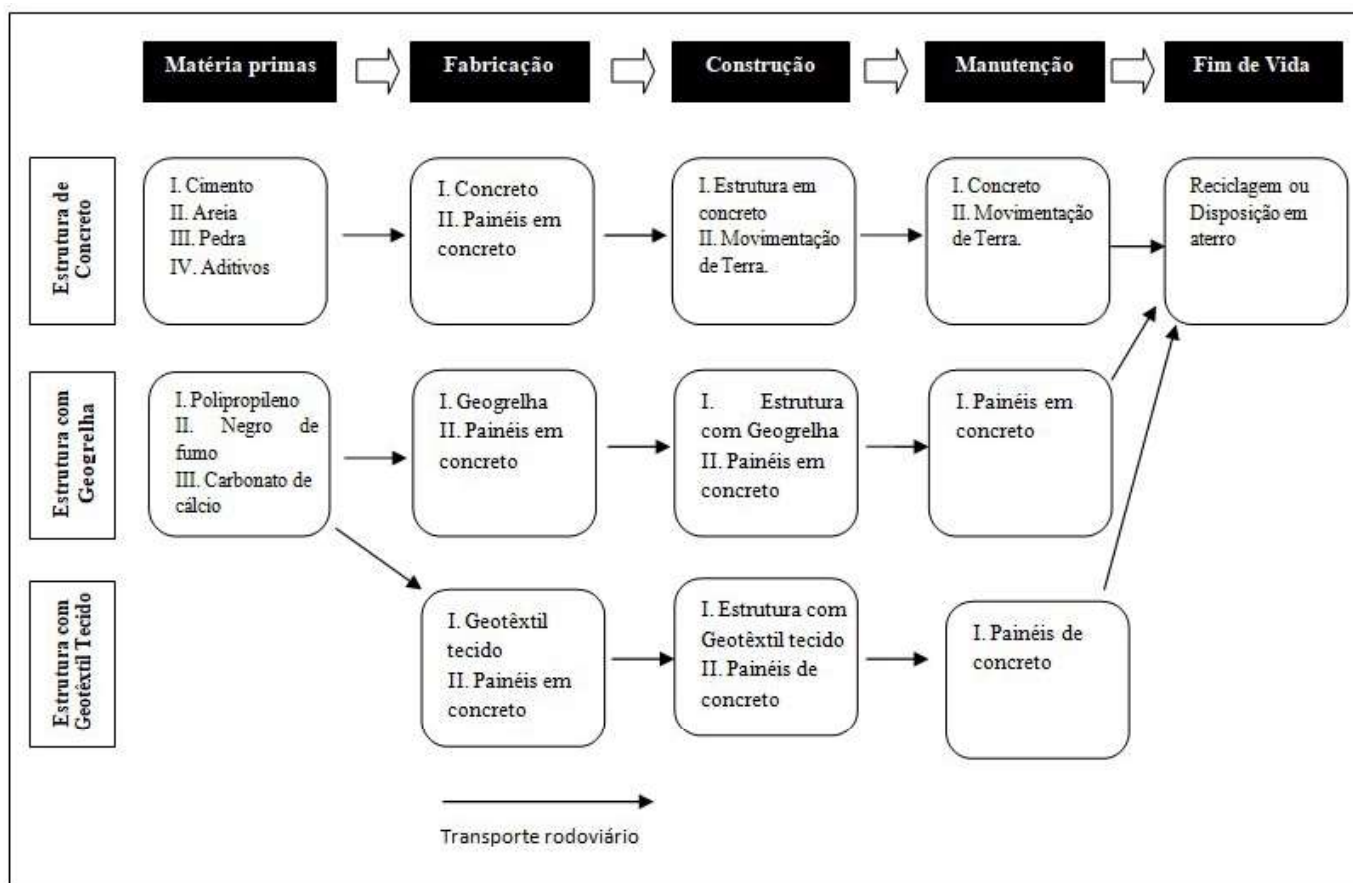


Figura 20 - Sistema do produto das estruturas de contenção de solos.

A Figura 20 apresenta um sistema de produto, que compara três sistemas de estruturas: uma de concreto convencional e duas de solos reforçados com geossintéticos (geogrelha e geotêxtil). Este propõe estudo uma ACV completa, o sistema de produto descreve as principais fases do ciclo de vida para cada alternativa — desde a extração de matérias-primas, passando pela fabricação, execução e manutenção, até a disposição final dos materiais. Essa estrutura permite uma análise sistemática e comparativa dos impactos ambientais, a fim de avaliar o desempenho ambiental de cada processo.

### 3.3.4 Escopo Geográfico

Para a etapa de fabricação, as distâncias de transporte dos insumos do concreto foram consideradas como o trajeto até a usina de produção, enquanto para os geossintéticos, considerou-se a distância relativa a partir da sede da fábrica.

Referente à parte executiva e de manutenção, todas as distâncias foram calculadas em relação à São Carlos, sendo este o escopo geográfico dessas etapas, a cidade de São Carlos – SP, cidade da região do centro-oeste do interior do estado de São Paulo, com aproximadamente 260.000 habitantes. Os materiais componentes do sistema do produto serão todos considerados em relação à localização desta cidade.

Ainda referente ao escopo geográfico, mas sobre a etapa de destinação final, as distâncias de transportes consideradas para o descarte dos materiais, sendo estas distâncias próximas de onde foi realizada a obra.

### 3.3.5 Escopo Temporal

Definir o escopo temporal de estruturas geotécnicas em solos reforçados com geossintéticos envolve identificar a aplicação dos geossintéticos. Segundo Carneiro (2009), alguns fatores muito importantes devem ser levados em consideração na tentativa de assegurar o funcionamento requerido para os geossintéticos durante o tempo de vida útil, como, por exemplo, identificar os principais agentes e ações que causam degradação e avaliar a resistência dos materiais frente a eles (Carneiro, 2009).

O tempo de vida esperado, ou seja, o período de tempo em que os geossintéticos devem desempenhar corretamente as funções para as quais foram instalados pode variar de meses até mais de uma centena de anos (Greenwood *et al.*, 2012).

Os sistemas construtivos de solos reforçados com geossintéticos se enquadram na categoria reforço, em estruturas de contenção. Portanto, para estas estruturas o tempo de vida útil mínimo é de 50 anos, sendo este o escopo temporal definido.

Para o período de coleta dos dados da estrutura de solos reforçada com geossintético foi considerado em relação aos anos de 2022 e 2023. Para a estrutura tradicional foi considerado em relação aos anos de publicação dos artigos, que foram dos últimos 5 anos.

### 3.3.6 Escopo Tecnológico

Para que os dados de inventário possam representar de forma válida os impactos ambientais de um sistema, devem ter representatividade e adequação, abrangendo a coleta de dados relacionados à tecnologia.

O escopo tecnológico deste estudo está diretamente relacionado aos processos apresentados no sistema do produto. Portanto, os dados a serem coletados na fase de ICV devem corresponder a entradas e saídas desses processos. O escopo tecnológico é considerado atual e estático, pois serão consideradas as tecnologias atualmente utilizadas, sem previsões de desenvolvimento de novas tecnologias.

## 3.4 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA.

Este estudo utilizou o modelo atribucional de ciclo de vida, o qual descreve os impactos potenciais ambientais que podem ser atribuídos a um sistema ou produto (Martineti, 2015).

Modelos atribucionais fazem uso de registros históricos, fatos embasados, dados de medição de conhecidas incertezas e inclui todos os processos que são identificados como relevantes contribuições para o sistema a ser estudado (Saade, 2017).

A pesquisa foi baseada em fontes de dados primárias e, na falta desses dados primários, em fontes de dados secundárias para a elaboração dos inventários do ciclo de vida.

Para esta pesquisa, para as estruturas de solos com geossintéticos foram realizadas coletas de dados nas empresas que fabricam e executam obras com estes materiais. No caso da estrutura em concreto recorreu-se à literatura técnica, que foram

trabalhos relevantes sobre o tema (Zastrow *et al.*, 2016; Balasbaneh *et al.*, 2021; Balasbaneh *et al.*, 2020; Pons *et al.*, 2018).

Os principais tipos de dados coletados no estudo de ICV integrante deste trabalho foram àqueles ligados as entradas e saídas de massa, água e energia, dos sistemas de produto.

A seguir, foram descritos com detalhes as etapas das estruturas de contenção e os dados utilizados que estão nos seus respectivos Anexos D.

### 3.4.1 Fabricação dos materiais

Para a fabricação de 1kg dos geossintéticos foram considerados todos materiais fornecidos pelo fabricante, abrangendo todos os recursos necessários para a produção da geogrelha e do geotêxtil tecido (Anexos D1).

No que diz respeito à matéria-prima dos geossintéticos, foram considerados como materiais básicos o polietileno e o poliéster. Entretanto, existem poucas diferenças entre os tipos de polímeros adotados (Raja *et al.*, 2014). Isso pode sugerir que a escolha entre esses diferentes materiais, pode não ter um impacto substancial entre o geossintético que for fabricado.

Por se tratar de empresas importantes do setor e que possuem tecnologias para se diferenciarem do mercado, não foram informados os nomes das mesmas, mantendo-as em total sigilo.

Para a produção de 1kg de concreto foram considerados os insumos básicos para a sua produção: pedra, areia, cimento e água, também foi considerado o aditivo superplastificante que é o material usado para melhorar a trabalhabilidade do concreto com menores acréscimos de água, melhorando, assim, sua resistência.

Foram consideradas as seguintes quantidades de matéria-prima, para a geogrelha: Polipropileno (95%) e Color Masterbatch — negro de fumo (5%); e para geotêxtil tecido: polipropileno (96%), Color Masterbatch — negro de fumo (1%) e Filler Masterbatch — carbonato de cálcio (3%). Para o concreto, foi considerada a seguinte composição em kg de massa: 1:3:6 (cimento: areia: pedra), com quantidade de água de 60% em relação à quantidade de cimento. A resistência característica do concreto considerada para a estrutura tradicional foi de 30 MPa.

O diesel foi o principal combustível adotado para os veículos de transporte de materiais das estruturas até suas fábricas. Alguns maquinários também funcionavam à diesel e outros à eletricidade.

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia - MME (2023), o Brasil possui uma matriz elétrica majoritariamente renovável, com 88% da oferta interna de energia elétrica oriunda de fontes limpas em 2022. A geração hidrelétrica assume o papel como principal fonte, respondendo por 64% da oferta (Figura 21).

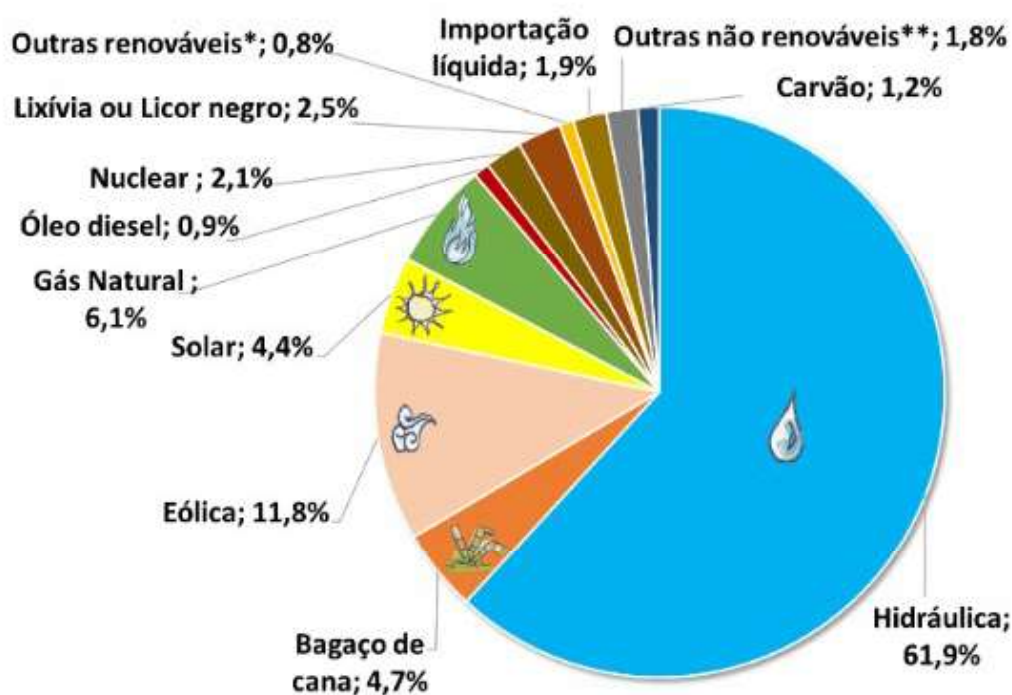


Figura 21 - Matriz energética do Brasil (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME, 2023).

As demais fontes renováveis com participações expressivas são a eólica (11,8%), a solar (4,8%) e o bagaço de cana (4,4%). Completam o panorama energético o licor negro ou lixívia, a importação líquida e outras fontes renováveis. Essa diversificação na geração de energia, com ênfase em fontes renováveis, evidencia o compromisso do país com a sustentabilidade e a segurança energética (MME, 2023).

### 3.4.2 Execução das estruturas

Para o processo de construção foram necessárias máquinas de escavação e compactação, sendo o óleo diesel, da mesma forma que para o processo, o combustível

mais utilizado nessas máquinas. Em algumas situações foi necessário utilizar compactadores manuais que tiveram também como combustível o diesel.

Neste estudo, não foram considerados os materiais ou processos que ocorrem abaixo da superfície de cada estrutura. Assumiu-se que o lençol freático estaria abaixo da base e que, portanto, não teria influência nas análises realizadas.

Para as três estruturas de contenção foi executada uma camada de pedra, além da instalação de tubulações para auxiliar a drenagem dessas estruturas.

Para as estruturas de contenção de solos reforçadas com geossintéticos foi executado um lastro em concreto. As estruturas de solos foram compactadas em camadas, com espessura de 30 centímetros. Os geossintéticos foram instalados na posição vertical a cada 75 centímetros nas camadas.

Para auxiliar a execução das estruturas de solos reforçadas com geossintéticos e a estrutura em concreto foram utilizados painéis de madeira, sendo esses painéis reutilizáveis. Também foi realizado um procedimento de impermeabilização a fim de aumentar a vida útil das estruturas.

Já com relação ao aço utilizado na estrutura de gravidade, esse não teve função estrutural e, portanto, não foi considerado para a análise dos potenciais impactos dessa pesquisa.

Todas as quantidades dos materiais necessárias para a execução de 1 m<sup>3</sup> das três estruturas foram listados no Anexo D2. Todas as informações foram fornecidas por empresas brasileiras que realizaram a construção de estruturas de solos reforçados com geossintéticos.

### 3.4.3 Manutenção das estruturas

Para o trabalho de manutenção, foram necessárias as mesmas máquinas utilizadas na construção das estruturas e os materiais foram descritos no Anexo D3.

Referente às frequências de manutenções das estruturas, em sua maioria, essas atividades são determinadas pelos responsáveis por sua gestão, que devem respeitar a durabilidade dos materiais empregados e a sua condição atual. No entanto, para aumentar a vida útil das estruturas devem ser realizadas inspeções rotineiras anualmente e uma inspeção especial a cada período de 5 anos, e, quando necessário, inspeções extraordinárias NBR 9452 (ABNT, 2023), e foi desta forma que foi realizada para a análise dos impactos tanto nas estruturas em concreto quanto nas estruturas de solos.

As estruturas de solos reforçadas com geossintéticos, de acordo com informações da construtora, foram projetadas para seu período de vida útil sem nenhuma grande intervenção, por serem estruturas enterradas. Por isso, a principal intervenção neste tipo de estrutura foi a recomposição do revestimento da face.

#### 3.4.4 Destino final

Para os cálculos do fim de vida das estruturas de contenção (Anexo D4), após os processos de manutenção, a estrutura de concreto de gravidade foi reciclada com uma taxa de 90% (Santos, 2018), essa taxa de reciclagem pode ser alcançada, segundo o mesmo autor, se o material for previamente separado antes do processo de reciclagem. O restante do concreto foi destinado para o aterro sanitário.

Para os geossintéticos foram adotados taxa de reciclagem de 80% tanto para a geogrelha quanto para geotêxtil tecido, o restante do material foi descartado em aterro sanitário após o uso (Bizjak, 2018).

Como parte das operações de destino final, foram incluídos o transporte até o aterro que foi considerado uma distância de 50 km e a operação das máquinas que foi considerado um consumo de 3 litros a cada hora por metro cúbico. Para disposição em aterro sanitário, todos esses maquinários tiveram como combustível o diesel.

#### 3.4.5 Distância de Transporte

O transporte de materiais, o deslocamento e execução de serviços com auxílio de máquinas foram inseridos em suas respectivas fases, produção, construção, manutenção e na fase de fim de vida.

Os processos de transporte, entre os processos, foram realizados por transporte rodoviário. Para o cálculo das Distâncias de Transportes (DT) foram utilizadas distâncias reais com base no seu ponto inicial até seus respectivos destinos.

O impacto ambiental para os transporte foi calculado com base na equação (10), que multiplica a massa (m) do respectivo material, em toneladas, pela sua distância (d), em quilômetros, do seu fornecedor ou local de origem até seu destino.

$$DT = m \times d \quad (10)$$

Sendo:

DT: o resultado do cálculo de transportes em tkm;

m: a massa dos materiais em toneladas (t)

d: a distância em quilômetros (km)

### 3.5 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)

Neste trabalho de pesquisa, a AICV foi conduzida utilizando o método ReCiPe (2016). A seleção desse método foi motivada pela sua capacidade de abranger várias categorias de impacto. Além disso, na Revisão Sistemática da Literatura (Tabela 3), foi observado que dentre os métodos utilizados pelos pesquisadores, este método foi o mais utilizado, com aproximadamente 40% dos autores utilizando este método, tornando-o o método mais utilizado entre os pesquisadores que investigaram a temática.

E, apesar do método ReCiPe contemplar 17 categorias, em nível intermediário, essas categorias selecionadas para o estudo foram apresentadas na Tabela 5. Pois, foram as mesmas categorias utilizadas em outras pesquisas que estudaram sobre ACV em estruturas de solos reforçado com geossintéticos (Damians *et al.*, 2015; Heerten *et al.*, 2012). Podendo ser consideradas essas categorias as mais relevantes para essa temática.

Tabela 5 - Categorias de impacto empregadas no estudo

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>Sigla Referência</b>
Eutrofização de água doce	kg P eq	EAD
Toxicidade humana não cancerígena	kg 1,4-DCB	THNC
Mudanças climáticas	kg CO <sup>2</sup> eq	MC
Eutrofização marinha	kg N eq	EM
Formatação da Camada Ozônio Terrestre	kg NO <sub>x</sub> eq	FCOT
Acidificação terrestre	kg SO <sup>2</sup> eq	AT
Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	ERM

O método ReCiPe foi selecionado para este estudo para calcular categorias de ponto médio, no entanto, este método tem utilidade para calcular categorias de impacto *midpoint* e *endpoint* (Goedkoop *et al.*, 2008).

O programa empregado para a realização da ACV foi OpenLCA. Todos os dados coletados, primários e secundários, foram caracterizados pelo método ReCiPe (2016), e os resultados alcançados foram analisados, tratados posteriormente e transformados em gráficos para auxiliar na compreensão dos potenciais impactos

ambientais. Posteriormente, foi aplicado o fator de normalização proposto no Europe ReCiPe H, 2000, que representa o impacto da Europa para 2000 (Sleeswijk *et al.*, 2008; Aymard e Botta-Genoulaz, 2017). A escolha desses padrões se justifica, pois não há regulamentação relevante no Brasil. Por esse motivo, foram utilizadas as instruções da regulamentação europeia, por serem mais representativas da área.

Segundo Hélias *et al.* (2017), a normalização é um processo que visa tornar comparáveis os resultados de diferentes indicadores de categorias de impacto em uma ACV. O procedimento de normalização é realizado dividindo os resultados de cada categoria por um valor de referência predefinido, permitindo uma análise mais abrangente e objetiva dos impactos ambientais (Huddleston *et al.*, 2020). Os fatores de normalização utilizados nesta pesquisa foram os mostrados na Tabela 6, a seguir:

Tabela 6 – Fatores de normalização

<b>Sigla Referência</b>	<b>Unidade</b>	<b>Fator de Normalização</b>
EAD	kg P eq	$6,49 \times 10^{-1}$
THNC	kg 1,4-DCB	$1,49 \times 10^{+13}$
MC	kg CO <sup>2</sup> eq	$7,99 \times 10^{+14}$
EM	kg N eq	$4,61 \times 10^{+14}$
FCOT	kg NO <sub>x</sub> eq	$1,78 \times 10^{+14}$
AT	kg SO <sup>2</sup> eq	$4,10 \times 10^{+13}$
ERM	kg Cu eq	$1,20 \times 10^{+14}$

### 3.6 INTERPRETAÇÃO

Nesta etapa de interpretação da Avaliação do Ciclo de Vida foram analisados quais os processos elementares que têm o maior potencial de impactar ao meio ambiente nas estruturas de contenções analisadas, ao longo de seus ciclos de vidas. Posteriormente, foi comparado cada um dos processos elementares entre as estruturas com geossintéticos e com a estrutura tradicional.

A ACV e a análise de circularidade dos materiais são ferramentas importantes para a avaliação ambiental (Fagone *et al.*, 2023). No entanto, na maioria dos casos elas são utilizadas de forma independente. E Embora ambas ofereçam perspectivas distintas, quando combinadas, podem fornecer uma compreensão mais abrangente e robusta da sustentabilidade de serviços e sistemas. Portanto, esta etapa do trabalho objetivou relacionar os sistemas a fim de compreender se estrutura com menor potencial foi a mais circular ou se o inverso.

### 3.7 ANÁLISE DE CIRCULARIDADE DOS PRINCIPAIS CONSTITUINTES DAS ESTRUTURAS

Os indicadores de circularidade foram desenvolvidos com o propósito de auxiliar as organizações na avaliação e comunicação do progresso de seus empreendimentos no contexto da Economia Circular (EMF, 2019). Essas métricas desempenham uma função essencial como orientação para as tomadas de decisões, permitindo a comparação de diversos materiais, produtos e processos em diferentes cenários, a fim de realizar a avaliação da circularidade (Aymard, 2017).

O Indicador de Circularidade de Material (MCI) foi desenvolvido principalmente pela combinação de quatro características do produto: a quantidade de matéria-prima virgem (V) usada durante a fabricação; o volume de resíduos não recuperáveis (W) atribuídos ao produto; o indicador de fluxo linear (LFI); e um fator de utilidade (F(X)) que considera a durabilidade e a intensidade de uso do produto (EMF, 2019). Abaixo está a equação 9 que descreve o MCI:

$$\text{MCI} = 1 - \text{LFI} \times \text{F(X)} \quad (9)$$

O MCI atribui uma pontuação variando de 0 a 1 para representar o nível de circularidade de um produto de materiais, onde valores mais próximos de 1 indicam um nível mais elevado de circularidade do produto. Devido à sua inclusão de parâmetros relacionados à reutilização, a materiais reciclados, à eficiência do processo de reciclagem, à vida útil do produto e a seu tratamento ao fim de vida, o MCI é considerado uma métrica robusta (EMF, 2019).

Os resultados do MCI para as estruturas de contenção tradicional foram calculados considerando seu principal insumo, que consistia no concreto. Para as outras duas estruturas de contenção de solos, os principais componentes foram a geogrelha e o geotêxtil tecido. Para os valores de MCI que ficassem com valores próximos de 1 poderiam ser considerados materiais com alta circularidade e próximos de 0 para os materiais que se caracterizaram como não circulares.

### 3.8 ANÁLISES DOS CENÁRIOS PROPOSTOS

Propôs-se realizar uma análise de cenários e, com o propósito de atingir tal

objetivo, foram efetuadas análises relativas à alteração da face das estruturas de solos. Neste trabalho foram realizados estudos ambientais com a face em concreto, mas também é uma prática muito comum executar na face plantio de grama ao invés da face em concreto. Portanto, a fim de entender quais seriam os graus diminuições dos potenciais de impactos nas estruturas de solos reforçados após o plantio de vegetação, foi realizada tal verificação.

Ainda nestas análises, foram propostos cenários para avaliar a circularidade dos materiais.

O reaproveitamento do concreto pode proporcionar consideráveis benefícios socioeconômicos e ambientais, além de apresentar vantagens técnicas, com a possibilidade de substituir até 50% dos agregados tradicionais por materiais reciclados, sem comprometer as propriedades mecânicas da mistura (Santos, 2018).

Com o intuito entender a evolução do MCI do concreto, da geogrelha e do geotêxtil tecido, foram realizadas análises ambientais com diferentes acréscimos de teores de materiais (Tabela 7). As adições de materiais reciclados avaliados foram de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em substituição aos materiais virgens. A finalidade foi analisar a influência do incremento desses materiais reciclados nos valores de MCI do concreto, da geogrelha e geotêxtil tecido.

Tabela 7 - Porcentuais de resíduos acrescidos para o cálculo do MCI e CTI para os materiais.

Material	Componentes	Acréscimos do material reciclado				
		10 (%) (%)	20 (%) (%)	30 (%) (%)	40 (%) (%)	50 (%) (%)
<b>Material Reciclado antes do uso (%)</b>	Concreto com materiais virgens	90	80	70	60	50
	Concreto com materiais reciclados	10	20	30	40	50
	Geogrelha com materiais virgens	90	80	70	60	50
	Geogrelha com materiais Reciclados	10	20	30	40	50
	Geotêxtil Tecido com materiais virgens	90	80	70	60	50
	Geotêxtil Tecido com materiais reciclados	10	20	30	40	50
<b>Material Reciclado após o período de uso (%)</b>	Concreto com materiais virgens	90	80	70	60	50
	Concreto com materiais reciclados	10	20	30	40	50
	Geogrelha com materiais virgens	90	80	70	60	50
	Geogrelha com materiais Reciclados	10	20	30	40	50
	Geotêxtil Tecido com materiais virgens	90	80	70	60	50
	Geotêxtil Tecido com materiais reciclados	10	20	30	40	50

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

Nesta etapa do trabalho foram apresentados os resultados no que se refere à Avaliação de Impactos Ambientais e Análise de Circularidade dos principais constituintes das três estruturas de contenção de solos.

#### 4.1.1. Potenciais de Impactos

O desempenho das estruturas foi analisado e, nesta análise, foram calculados os impactos ambientais utilizando o método ReCiPe 2016, conforme descritos na seção de Metodologia. Foram considerados os processos de fabricação, execução, manutenção e fim de vida; adicionalmente, foram estudadas as sete categorias especificadas na Tabela 5, as quais se concentram nos efeitos na saúde humana e no ecossistema. Os resultados foram descritos na Tabela 8 para as três estruturas para as categorias analisadas.

Tabela 8 - Resultados não normalizados.

Estrutura de Contenção em Concreto				
Categoria de Impacto	Fabricação	Construção	Manutenção	Fim-de-vida
EAD	$3,37 \times 10^{-16}$	$1,89 \times 10^{-16}$	$1,29 \times 10^{-16}$	$1,04 \times 10^{-16}$
THNC	$9,94 \times 10^{-1}$	$2,26 \times 10^{+0}$	$3,04 \times 10^{-2}$	$6,70 \times 10^{-3}$
MC	$4,68 \times 10^{-4}$	$2,30 \times 10^{-3}$	$1,84 \times 10^{-4}$	$4,34 \times 10^{-4}$
EM	$4,65 \times 10^{-8}$	$2,25 \times 10^{-4}$	$1,80 \times 10^{-5}$	$4,24 \times 10^{-6}$
FCOT	$8,28 \times 10^{-5}$	$3,44 \times 10^{-4}$	$4,16 \times 10^{-5}$	$8,37 \times 10^{-6}$
AT	$4,69 \times 10^{-17}$	$1,08 \times 10^{-17}$	$1,70 \times 10^{-17}$	$2,22 \times 10^{-17}$
ERM	$1,45 \times 10^{-4}$	$9,85 \times 10^{-4}$	$9,23 \times 10^{-4}$	$2,05 \times 10^{-4}$
Estruturas de Solos Reforçados com Geogrelha				
Categoria de Impacto	Fabricação	Construção	Manutenção	Fim-de-vida
EAD	$8,36 \times 10^{-18}$	$4,86 \times 10^{-18}$	$2,38 \times 10^{-18}$	$8,47 \times 10^{-18}$
THNC	$3,14 \times 10^{-1}$	$6,13 \times 10^{-1}$	$4,27 \times 10^{-3}$	$3,19 \times 10^{-3}$
MC	$7,04 \times 10^{-5}$	$9,98 \times 10^{-5}$	$4,86 \times 10^{-6}$	$2,04 \times 10^{-5}$
EM	$1,57 \times 10^{-9}$	$1,88 \times 10^{-5}$	$8,81 \times 10^{-7}$	$6,03 \times 10^{-7}$
FCOT	$6,18 \times 10^{-6}$	$5,28 \times 10^{-5}$	$5,31 \times 10^{-7}$	$1,22 \times 10^{-6}$
AT	$1,19 \times 10^{-18}$	$8,97 \times 10^{-19}$	$5,75 \times 10^{-19}$	$6,61 \times 10^{-19}$
ERM	$7,07 \times 10^{-6}$	$5,27 \times 10^{-5}$	$2,75 \times 10^{-5}$	$6,32 \times 10^{-6}$
Estruturas de Solos Reforçados com Geotêxtil Tecido				
Categoria de Impacto	Fabricação	Construção	Manutenção	Fim-de-vida
EAD	$4,80 \times 10^{-18}$	$2,19 \times 10^{-18}$	$1,38 \times 10^{-18}$	$2,04 \times 10^{-18}$
THNC	$2,12 \times 10^{-1}$	$4,24 \times 10^{-1}$	$1,37 \times 10^{-3}$	$2,17 \times 10^{-3}$
MC	$5,15 \times 10^{-5}$	$5,03 \times 10^{-5}$	$2,49 \times 10^{-6}$	$1,33 \times 10^{-5}$
EM	$1,36 \times 10^{-9}$	$5,64 \times 10^{-6}$	$6,10 \times 10^{-7}$	$2,82 \times 10^{-7}$
FCOT	$3,87 \times 10^{-6}$	$9,82 \times 10^{-6}$	$5,31 \times 10^{-7}$	$7,70 \times 10^{-7}$

AT	$6,10 \times 10^{-19}$	$6,24 \times 10^{-19}$	$3,75 \times 10^{-19}$	$3,20 \times 10^{-19}$
ERM	$5,43 \times 10^{-6}$	$2,16 \times 10^{-5}$	$2,75 \times 10^{-5}$	$2,58 \times 10^{-6}$

Para o método de avaliação ReCiPe foi aplicado os fatores de normalização propostos por este método, descritos na Tabela 6. A aplicação destes fatores permitiu que todos os resultados fossem apresentados na mesma escala. Os resultados finais foram apresentados como impacto normalizado para as três estruturas, conforme descritos na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados normalizados.

<b>Estrutura de Contenção em Concreto</b>				
<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Fabricação</b>	<b>Construção</b>	<b>Manutenção</b>	<b>Fim-de-vida</b>
EAD	$5,19 \times 10^{-16}$	$2,92 \times 10^{-16}$	$1,98 \times 10^{-16}$	$1,61 \times 10^{-16}$
THNC	$1,24 \times 10^{-15}$	$2,83 \times 10^{-15}$	$3,81 \times 10^{-17}$	$8,39 \times 10^{-18}$
MC	$3,14 \times 10^{-17}$	$1,54 \times 10^{-16}$	$1,24 \times 10^{-17}$	$2,91 \times 10^{-17}$
EM	$1,01 \times 10^{-22}$	$4,89 \times 10^{-19}$	$3,90 \times 10^{-20}$	$9,21 \times 10^{-21}$
FCOT	$6,90 \times 10^{-19}$	$2,87 \times 10^{-18}$	$3,47 \times 10^{-19}$	$6,97 \times 10^{-20}$
AT	$2,64 \times 10^{-31}$	$6,10 \times 10^{-32}$	$9,59 \times 10^{-32}$	$1,25 \times 10^{-31}$
ERM	$3,54 \times 10^{-18}$	$2,40 \times 10^{-17}$	$2,25 \times 10^{-17}$	$4,99 \times 10^{-18}$
<b>Estruturas de Solos Reforçados com Geogrelha</b>				
<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Fabricação</b>	<b>Construção</b>	<b>Manutenção</b>	<b>Fim-de-vida</b>
EAD	$1,29 \times 10^{-17}$	$7,49 \times 10^{-18}$	$3,67 \times 10^{-18}$	$1,30 \times 10^{-17}$
THNC	$3,94 \times 10^{-16}$	$7,67 \times 10^{-16}$	$5,35 \times 10^{-18}$	$4,00 \times 10^{-18}$
MC	$4,72 \times 10^{-18}$	$6,70 \times 10^{-18}$	$3,26 \times 10^{-19}$	$1,37 \times 10^{-18}$
EM	$3,40 \times 10^{-24}$	$4,08 \times 10^{-20}$	$1,91 \times 10^{-21}$	$1,31 \times 10^{-21}$
FCOT	$5,15 \times 10^{-20}$	$4,40 \times 10^{-19}$	$4,42 \times 10^{-21}$	$1,02 \times 10^{-20}$
AT	$6,70 \times 10^{-33}$	$5,05 \times 10^{-33}$	$3,23 \times 10^{-33}$	$3,72 \times 10^{-33}$
ERM	$1,73 \times 10^{-19}$	$1,29 \times 10^{-18}$	$6,71 \times 10^{-19}$	$1,54 \times 10^{-19}$
<b>Estruturas de Solos Reforçados com Geotêxtil Tecido</b>				
<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Fabricação</b>	<b>Construção</b>	<b>Manutenção</b>	<b>Fim-de-vida</b>
EAD	$7,40 \times 10^{-18}$	$3,37 \times 10^{-18}$	$2,13 \times 10^{-18}$	$3,14 \times 10^{-18}$
THNC	$2,65 \times 10^{-16}$	$5,30 \times 10^{-16}$	$1,72 \times 10^{-18}$	$2,71 \times 10^{-18}$
MC	$3,46 \times 10^{-18}$	$3,38 \times 10^{-18}$	$1,67 \times 10^{-19}$	$8,91 \times 10^{-19}$
EM	$2,96 \times 10^{-24}$	$1,22 \times 10^{-20}$	$1,32 \times 10^{-21}$	$6,12 \times 10^{-22}$
FCOT	$3,23 \times 10^{-20}$	$8,18 \times 10^{-20}$	$4,42 \times 10^{-21}$	$6,41 \times 10^{-21}$
AT	$3,43 \times 10^{-33}$	$3,51 \times 10^{-33}$	$2,11 \times 10^{-33}$	$1,80 \times 10^{-33}$
ERM	$1,33 \times 10^{-19}$	$5,26 \times 10^{-19}$	$6,71 \times 10^{-19}$	$6,30 \times 10^{-20}$

Os resultados das contribuições dos impactos potenciais normalizados pela categoria de impacto nos processos de fabricação, construção, manutenção e fim de vida foram apresentados a seguir (Figuras 22, 23 e 24).

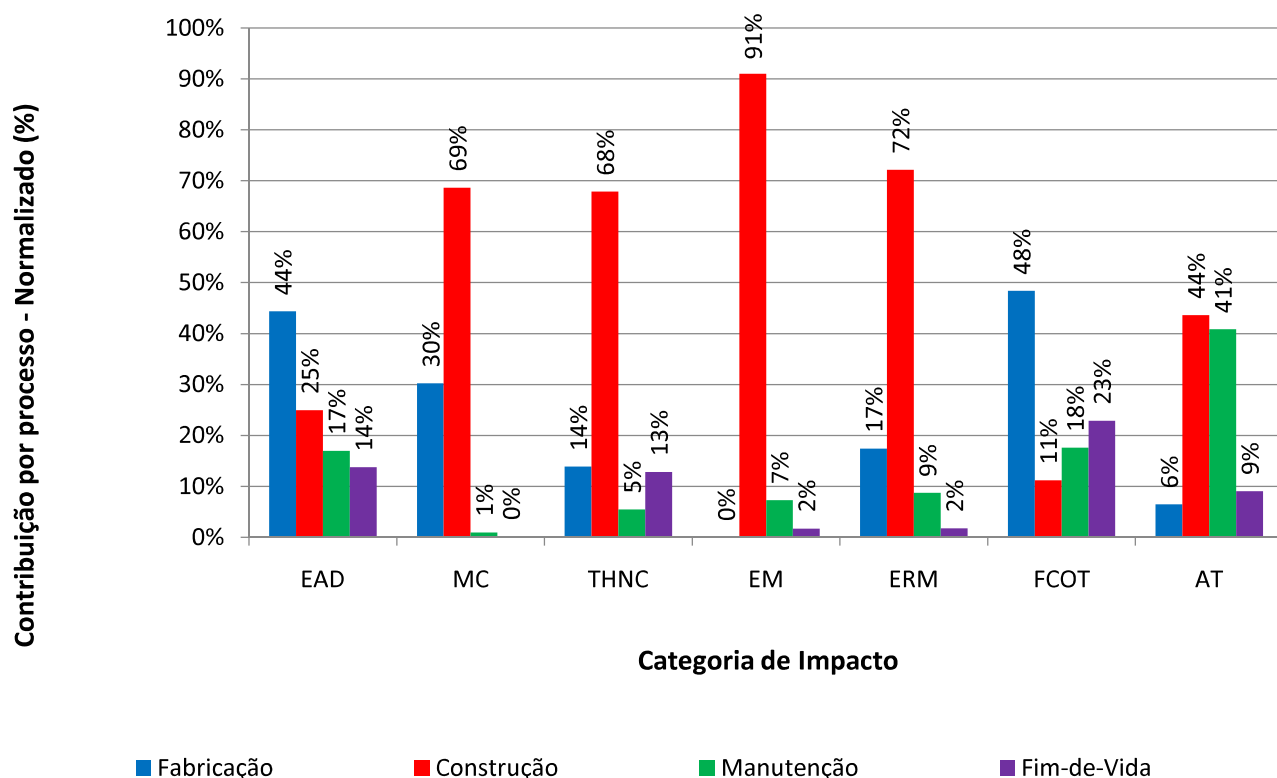


Figura 22 - Contribuição dos processos por categoria de impacto da Estrutura em Concreto.

Ao examinar qual processo apresentou a maior magnitude por categoria na Estrutura de Concreto Tradicional (Figura 22), observou-se que o processo de construção predominou em quatro das sete categorias analisadas, em todas essas quatro categorias MC, THNC, EM, ERM a contribuição para o processo de construção foi de pelo menos 65%. Durante o estágio de construção, para esta mesma estrutura de concreto, mais de 90% da participação foi atribuída à categoria EM.

O segundo processo com maior recorrência foi a manufatura, que teve a maior magnitude em duas das sete categorias. Na fase de manufatura da Estrutura de Concreto de Gravidade, a categoria EAD teve mais de 40%, e a categoria FCOT teve aproximadamente 50% da contribuição da fase de manufatura. A categoria de impacto AT teve uma contribuição semelhante entre as fases de construção e manutenção, com uma contribuição de aproximadamente 40% para ambos os processos.

Balashneh e Marsono (2020), que, ao conduziram uma (ACV) e identificaram que as fases de produção e construção respondem pela maior parcela das emissões totais de MC para todas as paredes analisadas, variando de 81% a 91%. Especificamente para o

muro de concreto armado, esta fase representou 91% do impacto total. Adicionalmente, os resultados de Zastrow *et al.* (2017), fortalecem os observados esses parâmetros observados.

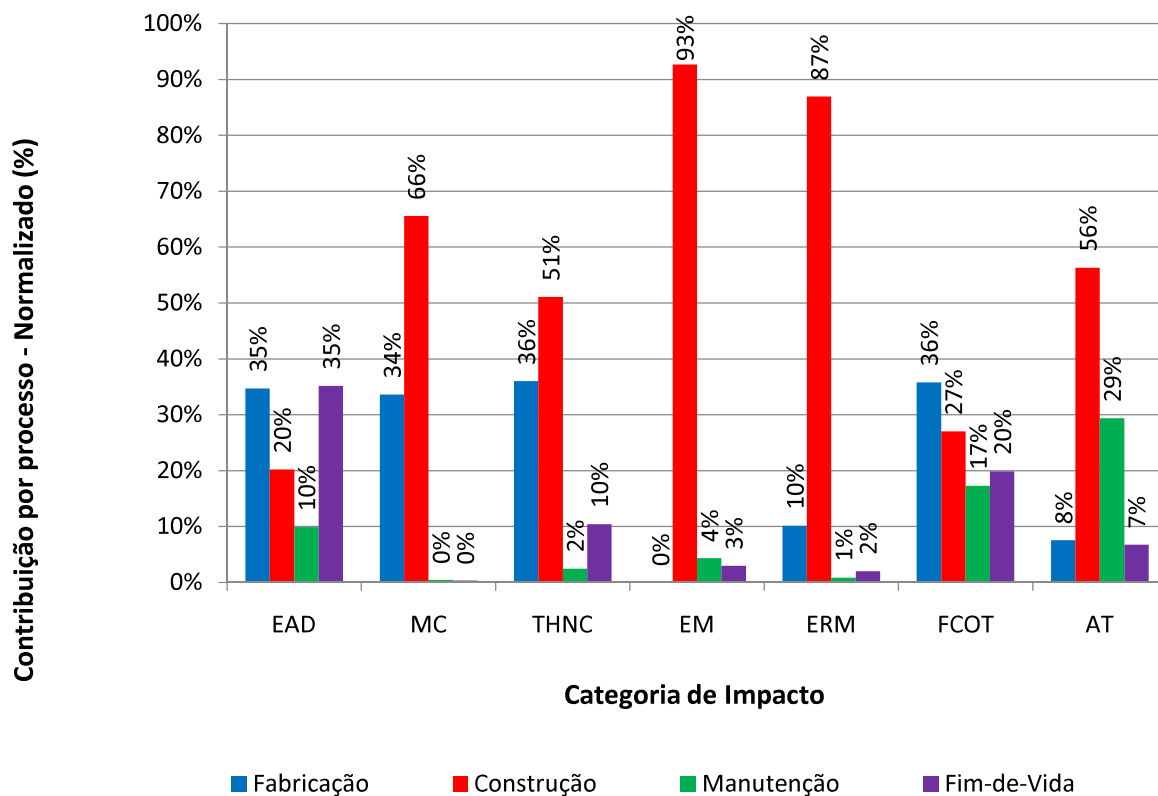


Figura 23 - Contribuição dos processos por categoria de impacto da Estrutura de Solos Reforçados com Geogrelha.

Por outro lado, para a Estrutura de Solos Reforçados com Geogrelha (Figura 23), esta análise seguiu a mesma tendência da Estrutura de Concreto, em que o processo de execução participou de cinco das sete categorias, a contribuição para o processo de construção foi de pelo menos 50% em todas as cinco categorias de impacto: MC, TNHC, EM, ERM e AT. Na fase de construção dessa Estrutura de Solos com Geogrelha, foi observada participação de mais de 95% na categoria EM, tornando-a a mais significativa durante a fase de execução. Além disso, semelhante à Estrutura de concreto, a fase de fabricação foi o segundo processo com maior participação nas sete categorias investigadas. Para a categoria de impacto EAD, as fases de fabricação e fim de vida tiveram valores semelhantes, com quase 40% de contribuições cada. A categoria de impacto FCOT teve a fase de fabricação como a maior contribuidora, com quase 40%.

Os resultados mostram concordância com os observados por Heerten (2012), que, em sua pesquisa, mostrou uma solução com geogrelha em vez de cal/cimento para reforço de estradas, podendo reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em até 27 vezes.

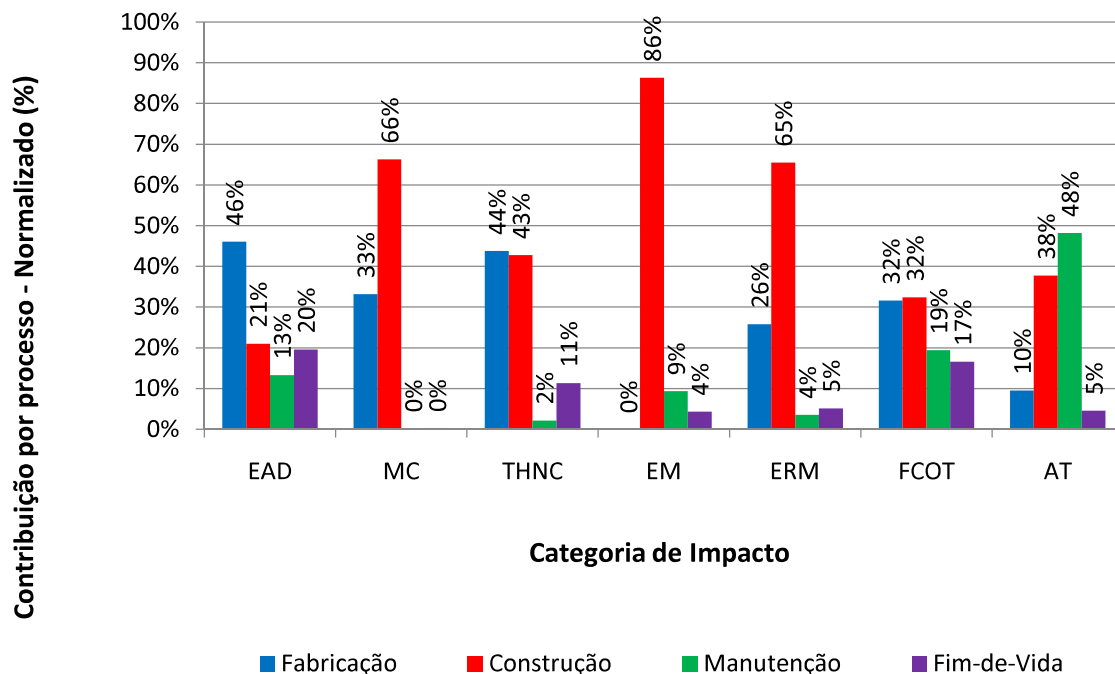


Figura 24 - Contribuição dos processos por categoria de impacto da Estrutura de Solos Reforçados com Geotêxtil Tecido.

Semelhante às estruturas anteriores, a Estrutura de Solos utilizando geotêxtil tecido (Figura 24) demonstrou maior contribuição durante a fase de execução, participando para três das sete categorias analisadas, a participação para essas três categorias, MC, EM e ERM, teve contribuições de aproximadamente 60%. Semelhante à Estrutura de Solos Reforçados com Geogrelha, a categoria EM teve a participação mais substancial durante a fase de construção, com mais de 80% de contribuição. Nas categorias de impacto EAD e TNHC, as fases de fabricação foram as que mais contribuíram, com mais de 40%. Na categoria FCOT, as fases de construção e fabricação foram as que mais contribuíram, com a fase de construção com contribuição de mais de 30%. Na categoria AT, a fase de manutenção foi a que mais contribuiu.

De forma semelhante aos resultados encontrados na Figura 23 (estrutura de solos reforçados com geogrelha), os resultados da Figura 24 (estrutura de solos reforçados com geotêxtil tecido) confirmam o que vários estudos, como os de Damians *et al.* (2016) e Bizjak *et al.* (2018), apontaram: as fases de fabricação e de construção são as

que geram a maior parte dos impactos ambientais em estruturas de solos reforçados com geogrelha e geotêxtil tecido.

De forma geral, os resultados (Figuras 22, 23 e 24) mostram que, em sua maior parte, a etapa de construção é a que mais contribui para os potenciais impactos ambientais nas três estruturas em estudo. Uma explicação plausível foi que durante a fase de execução, em todas as três estruturas, o concreto teve papel de destaque; na Estrutura Tradicional utilizou o concreto em praticamente em sua totalidade e nas Estruturas de Solos Reforçadas com geossintéticos foram empregados nas faces das estruturas. A segunda fase com mais contribuições foi a de fabricação, uma possível explicação poderia ser devido à necessidade de uso de diesel para queima de máquinas para compactação das camadas.

A pesquisa conduzida por Morsy e Thakeb (2022) fornece suporte adicional aos resultados encontrados no presente estudo, fortalecendo a sugestão de que as Estruturas de Solos Reforçadas com Geossintéticos podem ser mais sustentáveis ambientalmente. Os pesquisadores observaram que a construção de Estruturas Tradicionais por gravidade requer grandes quantidades de concreto. Além disso, de acordo com os mesmos autores, uma Estrutura de Solos Reforçada com Geogrelha pode emitir menos CO<sup>2</sup> porque requer menos concreto e mais solo para seu projeto. Essa mesma conclusão pôde ser observada por Bizjak *et al.* (2018), que reitera que o concreto e o cimento como principais componentes de estruturas podem ser causar elevados potenciais de impacto.

Nas análises de impactos relativos normalizados (Figuras 25, 26, 27 e 28), considera-se a estrutura de maior contribuição com 100%, que foi a estrutura em concreto, a fim de se investigar qual foi a diminuição em relação às demais estruturas em cada categoria de impacto.

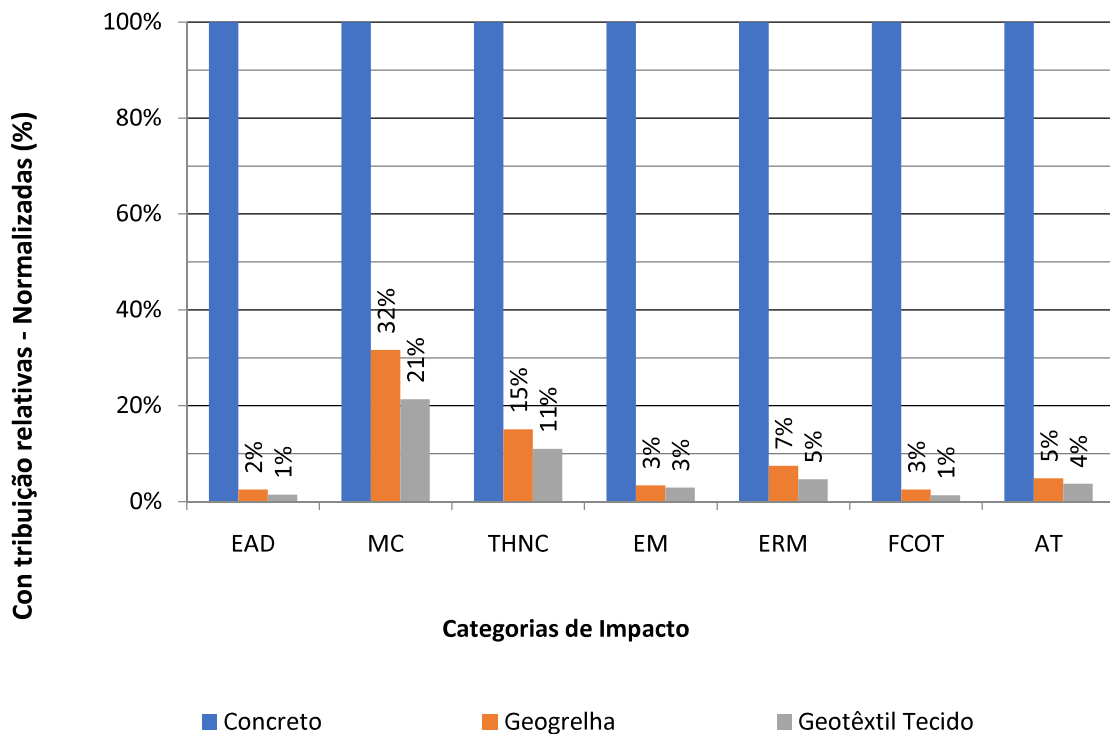


Figura 25 - Contribuição relativa dos impactos para o processo de fabricação.

Ao avaliar a categoria de impacto responsável pela redução mais substancial no processo de fabricação (Figura 25), observou-se que nas Estruturas de Solos Reforçados que utilizaram geogrelha e geotêxtil tecido, as categorias FCOT e EAD apresentaram reduções de mais de 90%. A categoria de impacto com as menores diferenças foi a MC para o processo de fabricação. As outras categorias, AT, THNC, EM e ERM, também tiveram reduções bem significativas em comparação com a Estrutura de Concreto Tradicional.

A razão pela qual o concreto domina o impacto da fabricação, como discutido na análise anterior e apoiado pela literatura, reside na produção de cimento, esses resultados são sustentados pelos trabalhos de Morsy & Thakeb(2022) e por Rafalko et al. (2010).

A seguir, estão descritos resultados das contribuições relativas para o processo de execução das Estruturas de contenção de Solos (Figura 26).

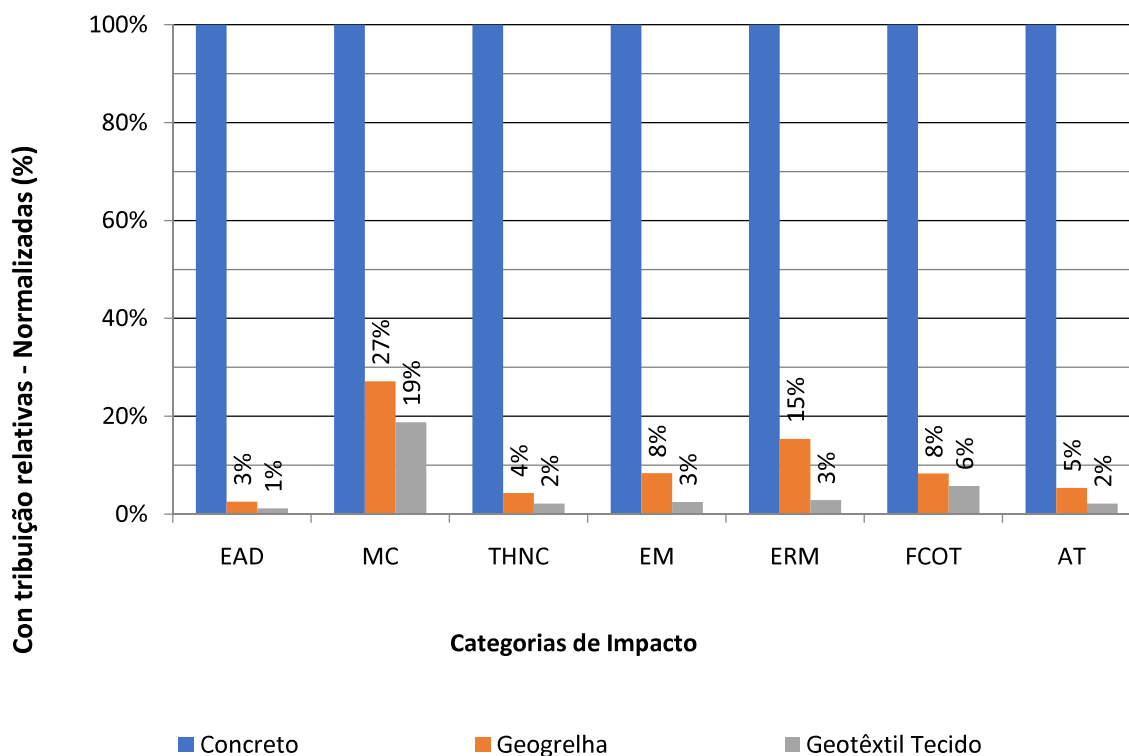


Figura 26 - Contribuição relativa dos impactos para o processo de execução.

Ao examinar os impactos relativos do processo de execução (Figura 26), as reduções mais notáveis, em torno de 95%, foram observadas nas Estruturas de Solos Reforçados com geogrelha e geotêxtil tecido. Notavelmente, a categoria EAD experimentou essa redução. A categoria com as menores diferenças, semelhante ao processo de fabricação, foi o MC para o processo de execução; as outras categorias, THNC, EM, ERM, FCOT e AT, tiveram reduções de mais de 80%.

Como demonstrado nas pesquisas de Heerten (2012) e Morsy e Thakeb (2022), o principal benefício ambiental nas estruturas de solos reforçados com geossintéticos vem justamente da substituição de grandes volumes de concreto por solo. O gráfico confirma que, quando o concreto está presente no projeto, torna-se a atividade mais impactante.

A seguir, estão descritos resultados das contribuições relativas ao processo de manutenção das Estruturas de contenção de Solos (Figura 27).

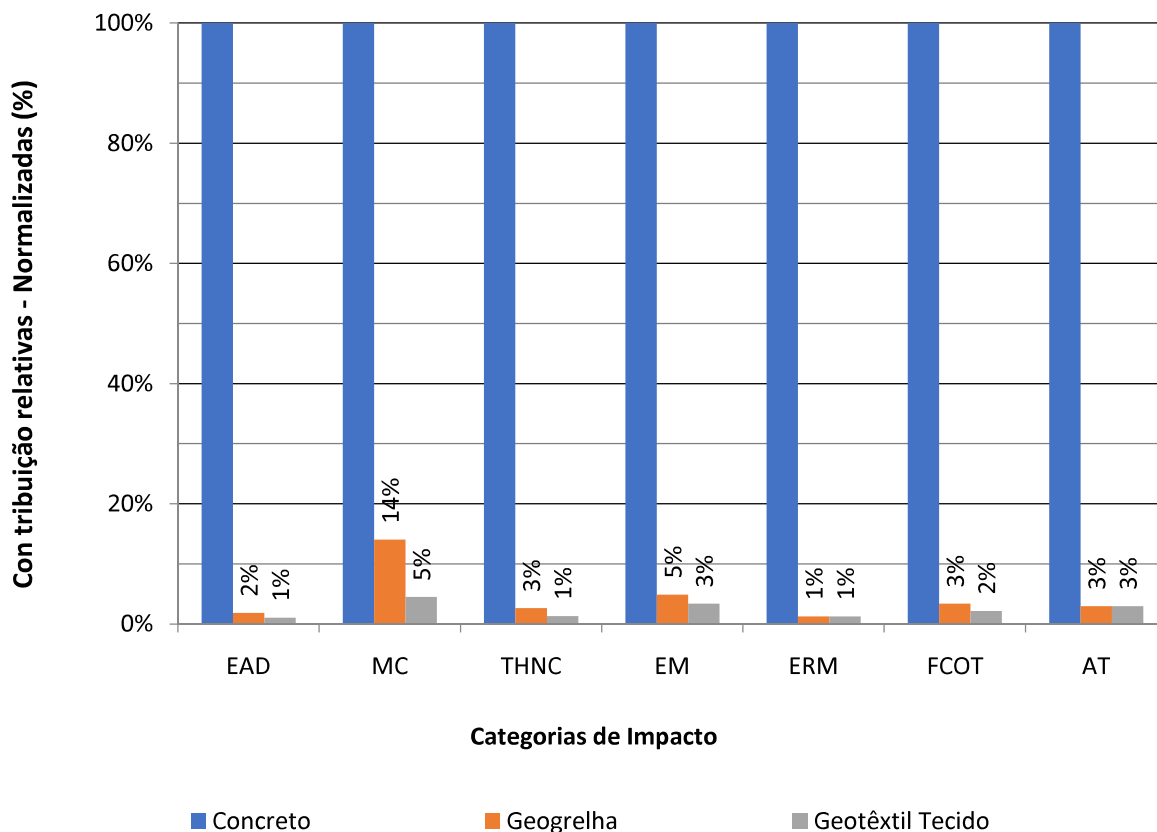


Figura 27 - Contribuição relativa dos impactos para o processo de manutenção.

Ao analisar as restrições relativas ao processo de manutenção (Figura 27), a redução foi bastante significativa, na ordem de 98%, em duas categorias de impacto: EAD e ERM. Similarmente aos processos de fabricação e construção, a categoria com as menores reduções foi o MC para o processo de manutenção; as outras categorias de impacto, THNC, EM, FCOT e AT, obtiveram reduções de mais de 90%.

Balashneh e Abidin (2021), em sua análise de ACV, incluem "reparos na superfície de concreto" e "reparos de fissuras em muros de alvenaria" como atividades da fase de manutenção frequentes. No entanto, os estudos de ACV em longos períodos de serviço, como os 100 anos assumidos por Morsy e Thakeb (2022) e Damians *et al.* (2016) para estruturas de solos reforçados com geossintéticos. Essa longa vida útil pressupõe que os componentes de reforço geossintético, uma vez instalados corretamente, não exigirão intervenção, reparo ou substituição durante o serviço da estrutura, necessitando apenas de intervenções na face em concreto, o que pode exigir manutenções mais frequentes nas estruturas tradicionais.

A seguir, estão descritos resultados das contribuições relativas ao processo de fim-de-vida das Estruturas de contenção de Solos (Figura 28).

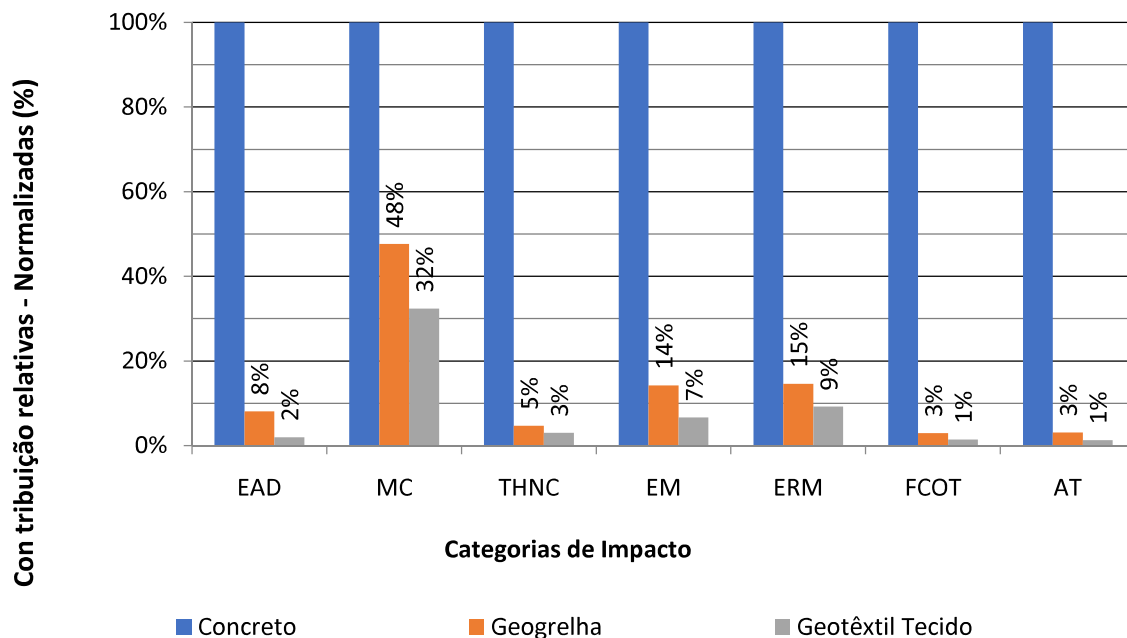


Figura 28 - Contribuição relativa dos impactos para o processo de fim de vida.

As reduções também foram significativas durante o processo de fim de vida (Figura 28), na ordem de 95%, especialmente em duas categorias de impacto: FCOT e AT. A categoria com as menores reduções foi MC para o processo de fim de vida, como foi o caso dos processos de fabricação, construção e manutenção. As outras categorias de impacto, EAD, THNC, EM e ERM, tiveram reduções de pelo menos 85% para ambas as Estruturas de Solos Reforçados com geotêxtil tecido e geogrelha.

Os resultados da Figura 28 da etapa de fim de vida, conforme descrito por Damians *et al.* (2016) e Molina-Moreno *et al.* (2017) envolve a demolição da estrutura e o transporte dos resíduos para aterros ou instalações de reciclagem. Para uma estrutura de solo reforçado com geossintético com face de concreto, o componente mais massivo a ser demolido e transportado é a própria face de concreto. As geogrelhas e geotêxteis, sendo leves e representando uma fração muito pequena da massa total, exigem muito menos energia para serem escavados e transportados. Esses resultados demonstram isso claramente: o esforço energético (e, portanto, as emissões) da demolição e transporte está quase inteiramente associado ao volume e peso do concreto, por conta disso que a estrutura

tradicional é a que mais contribui para os potenciais impactos, sendo que essas estruturas são todas em concreto.

Os trabalhos realizados por Damians *et al.* (2015, 2016) reforçaram os achados do presente estudo (25, 26, 27 e 28), mostrando que os Estruturas de Solos Reforçados com Geossintéticos podem ter menos impacto no meio ambiente. Os pesquisadores conduziram um estudo comparativo com duas Estruturas de Solos Reforçados, uma com geogrelha e a outra com tiras de aço, comparando essas duas Estruturas de Solos Reforçados com uma Estrutura de Gravidade Convencional. Os mesmos autores ainda investigaram a influência de diferentes alturas, e todos os indicadores aumentaram conforme a altura das estruturas aumentou. No entanto, os resultados não podem ser extrapolados, pois podem não representar com precisão os resultados do país local.

Adicionalmente, no estudo proposto por Lee e Basu (2024), os pesquisadores realizaram comparativo entre Estruturas de Solos Reforçados com tiras de aço ou geogrelhas, comparados com dois Estruturas diferentes em concreto, no qual os autores questionaram se Estruturas de Solos Reforçadas com Geossintéticos são mais sustentáveis ambientalmente quando comparados com Estruturas tradicionais e os resultados sugeriram que as Estruturas de Solos Reforçadas com Geossintéticos podem causar menos impactos potenciais. Esses dados corroboram o presente estudo que mostrou que Estruturas de Solos Reforçados com geossintéticos tiveram menores impactos ambientais em todas as categorias de impactos ambientais quando comparados com a Estrutura Tradicional de gravidade em concreto. Apesar dos benefícios ambientais das Estruturas de Solos Reforçados com Geossintéticos, os mesmos autores destacaram que alguns fatores, como tipos de solo, parâmetros de projeto, distâncias de transporte e propriedades do material de reforço, podem influenciar os potenciais impactos ambientais.

#### 4.1.2. MCI

Quando se analisou a circularidade dos principais constituintes das estruturas, que foram: o concreto, a geogrelha e o geotêxtil tecido através do MCI, observaram-se que os resultados das análises padrão, sem acréscimos de resíduos (materiais reciclados), que foram: a Estrutura tradicional em concreto e as Estruturas de Solos Reforçados com geossintéticos apresentaram resultados iguais, com valores de 0,1.

Um dos possíveis motivos para os baixos valores de desse indicas nas estruturas de contenções de solos pode ser o uso nesta condição de materiais virgens.

## 4.2. ANÁLISE DE CENÁRIOS

Conforme mencionado na seção 4 de metodologia, foram propostos cenários com o objetivo de compreender quais seriam benefícios ambientais do plantio da vegetação na face das Estruturas de Solos Reforçadas com geossintéticos. Para tanto, foram realizadas análises de cenários das mesmas Estruturas de Solos quando executadas com face de concreto (estudo atual) e quando realizados com face vegetal em substituição à face de concreto.

Adicionalmente, foram realizadas análises dos acréscimos dos acréscimos dos materiais reciclados em substituição dos materiais virgens, com a finalidade de se conhecer o comportamento do MCI, com as porcentagens descritas na Tabela 8.

### 4.2.1. Potenciais de Impactos

Nas análises dos potenciais impactos foram verificadas as proposições de cenários nas etapas de execução, de manutenção e de fim de vida.

Sobre a análise de cenário no processo de construção (Figura 29), referente aos resultados relativos, em ambas as Estruturas de Solos Reforçados com geogrelha (Figura 29a) e geotêxtil (Figura 29b) na face vegetal quando comparadas com face em concreto seguiram uma tendência, a categoria de impacto com maior decréscimo foi a MC tanto na Estrutura de Solos Reforçadas com geogrelha quanto na Estrutura de Solos Reforçada com geotêxtil tecido que foi da ordem de mais de 60%.

Já as categorias, em ambas as estruturas de solos reforçadas, que obtiveram as menores diminuições foram as categorias de EAD e a FCOT. As demais categorias tiveram reduções entre aproximadamente 20% e 30% para as Estruturas de Solos Reforçados com geogrelha e geotêxtil tecido.

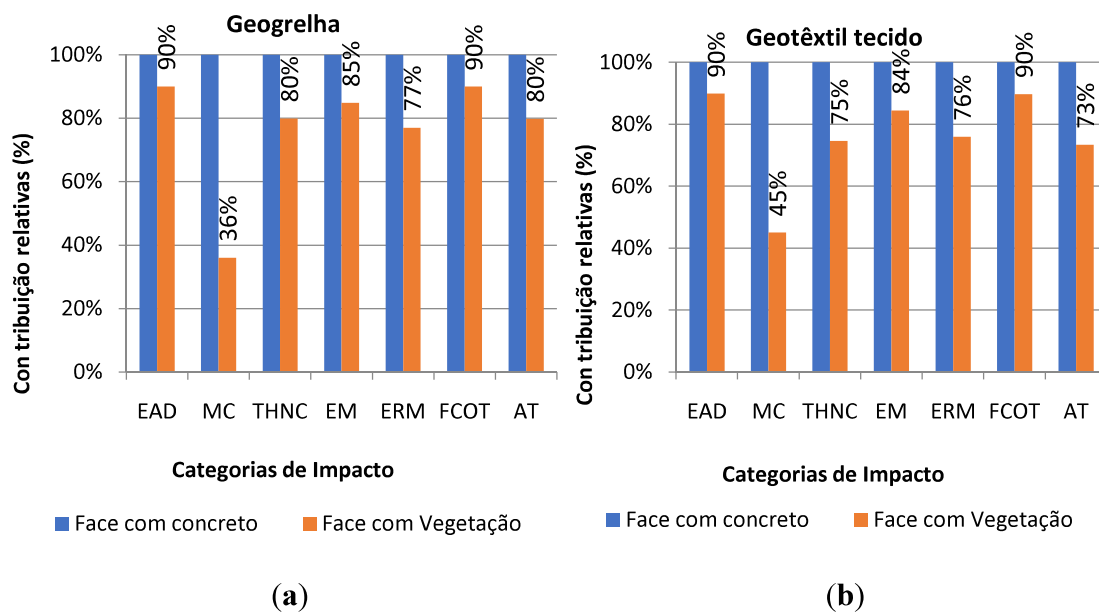


Figura 29 - Análise de cenários do processo execução das estruturas de: (a) Geogrelha; (b) Geotêxtil Tecido.

Estudo comparativo de ACV realizado por Heerten (2012), afirma que a diferença é impulsionada pela produção de cimento e pela logística de transporte. A indústria cimenteira é reconhecida globalmente como responsável por grandes emissões de CO<sub>2</sub> de origem humana, devido tanto à reação química de calcinação quanto à queima de combustíveis fósseis.

Ainda nas análises de cenários referentes ao processo de manutenção (Figuras 30), de forma semelhante ao processo de execução das estruturas (Figuras 29), tanto na Estrutura de Solos Reforçada com geogrelha (Figura 30a) quanto na Estrutura de Solos Reforçada com geotêxtil tecido (Figura 30b), a categoria de impacto com maior decréscimo foi a MC. Para a Estrutura de Solos Reforçada com geogrelha a categoria com menor diminuição foi a EM e para a Estrutura de Solos Reforçada com geotêxtil tecido houve várias categorias com resultados semelhantes, que foram: EAD, EM, FCOT e AT, sendo essas diminuições em torno de 70%.

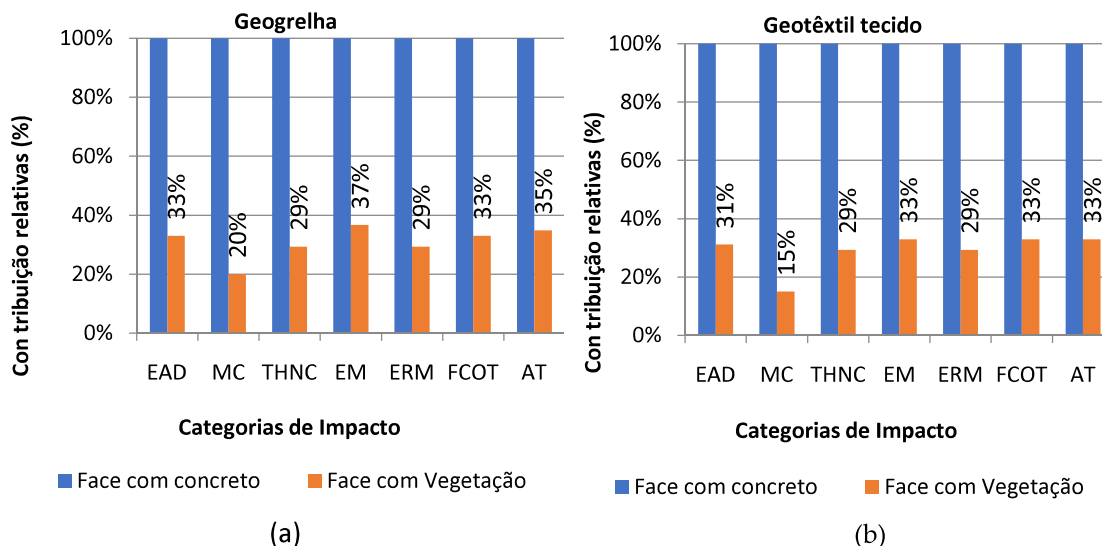


Figura 30 - Análise de cenários do processo de manutenção das estruturas de: (a) Geogrelha; (b) Geotêxtil Tecido.

Frischknecht *et al.* (2013) e Damians *et al.* (2016) corroboram com os valores encontrados, destacando a manutenção de áreas verdes envolve atividades contínuas de baixa intensidade, como roçada, irrigação e fertilização. Embora a produção de fertilizantes, especialmente os nitrogenados, tenha um impacto ambiental notável, a quantidade aplicada é pequena. Em contrapartida, a manutenção de estruturas de concreto, embora menos frequente, exige reparos com materiais de alta intensidade de impacto, como argamassas especiais e resinas cimentícias, para corrigir fissuras e degradação. A ACV demonstra que o impacto acumulado de muitas intervenções pequenas é menor do que o de poucas intervenções grandes.

Por fim, em relação à análise de cenários no processo de fim de vida útil (Figura 31), observou-se uma tendência semelhante aos processos de construção (Figura 29) e manutenção (Figura 30). A categoria de impacto que apresentou a redução mais significativa foi a MC (Figuras 30a e 30b), que indicou uma redução de aproximadamente 50% e 60% para Estruturas de Solos Reforçados com geogrelha e geotêxtil tecido, respectivamente. Por outro lado, ao analisar a categoria com menor redução relativa, a FCOT em ambas as Estruturas analisadas que apresentaram uma redução de mais de 15%. Ao analisar as demais categorias, as categorias THNC, EM e AT apresentaram reduções de aproximadamente 20% para ambas as Estruturas de Solos Reforçados com geogrelha e geotêxtil tecido. Para a categoria EAD, foi observada uma redução pelo menos 30% para ambas as Estruturas de Contenção de Solos com Geossintéticos.

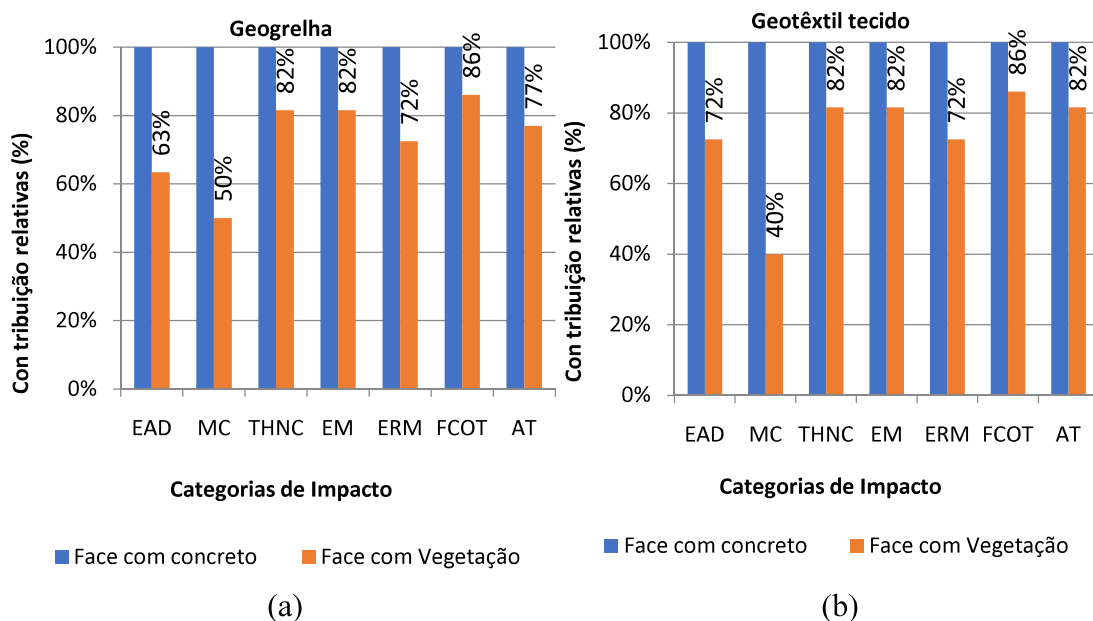


Figura 31 - Análise de cenários do processo de Fim de vida das estruturas de: (a) Geogrelha; (b) Geotêxtil Tecido.

Morsy e Thakeb (2022) chegaram a conclusões semelhantes, mencionando que embora a reciclagem do concreto seja uma prática benéfica, ela não elimina o alto consumo energético que geram grandes volumes de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) e poluição por poeira. A remoção de uma face vegetada, por outro lado, é um processo de terraplenagem de baixo impacto, evitando a necessidade de demolição pesada

De forma geral, o elevado consumo de concreto e cimento para execução de obras de engenharia civil configura-se como o principal fator de impacto ambiental no setor para a emissão de gases causadores das mudanças climáticas e do consumo excessivo de recursos naturais não renováveis (Boesch e Hellweg, 2010). Assim sendo, verifica-se benefícios ecológicos, em todas as categorias de impacto, com a viabilização da vegetação nas faces de taludes reforçados com geossintéticos (Damians *et al.*, 2015).

#### 4.2.2. MCI com acréscimos de materiais reciclados

Conforme descrito na seção de metodologia, foram realizadas análises ambientais sobre os acréscimos do concreto, da geogrelha e do geotêxtil tecido (Figura 32). Foram

propostas análises de cenários com adições de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% dos materiais reciclados em substituição aos materiais virgens, a fim de conhecer o comportamento do MCI com à medida que foram realizadas essas adições.

Observou-se que à medida que ocorreram esses acréscimos dos resíduos as estruturas se tornaram mais circular. As análises dos acréscimos dos resíduos mostraram que quando foram acrescidos 10% e 20% dos resíduos dos geossintéticos e do concreto, as estruturas se mantiveram com valores de MCI iguais. Já quando os incrementos foram entre 30% e 50%, observou-se uma pequena vantagem da tradicional de concreto em relação às Estrutura de Solos Reforçado com geossintéticos.

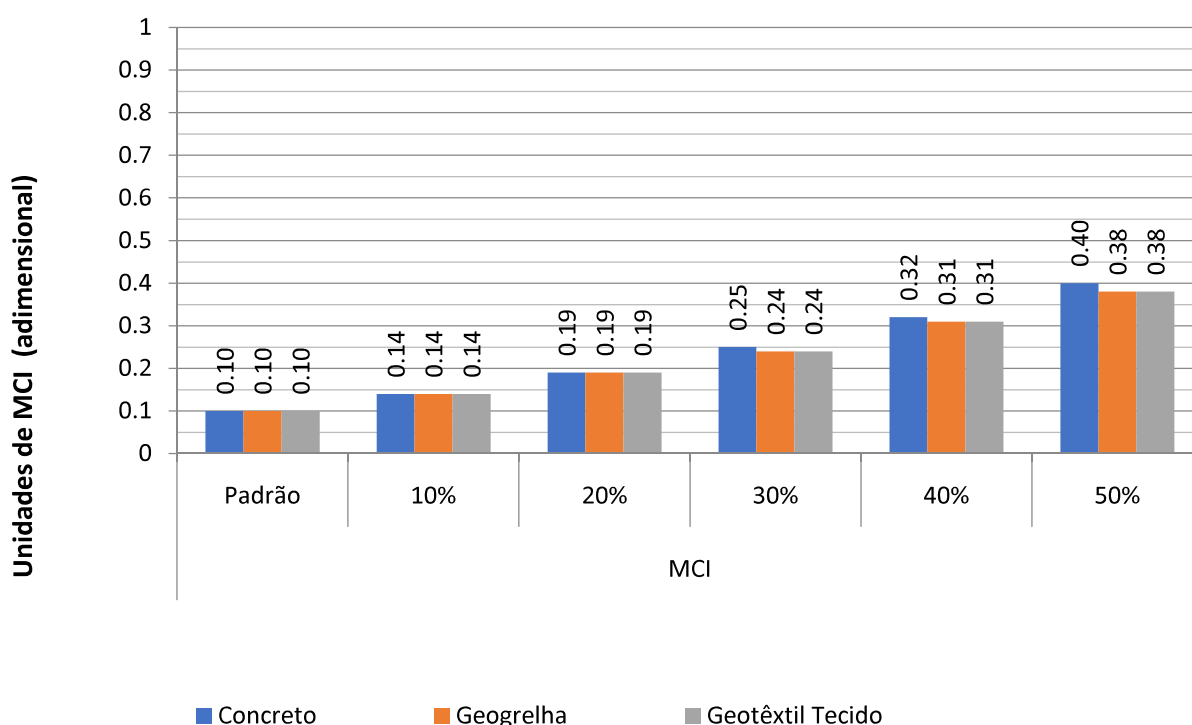


Figura 32 - Análise de cenários do MCI.

#### 4.2.3. MCI comparado com CTI

A seguir, são os resultados, através da Figura 33, dos geossintéticos e do concreto, esses resultados foram acrescidos, de forma semelhante aos cálculos do MCI, de 10% em 10% até 50% de materiais reciclados.

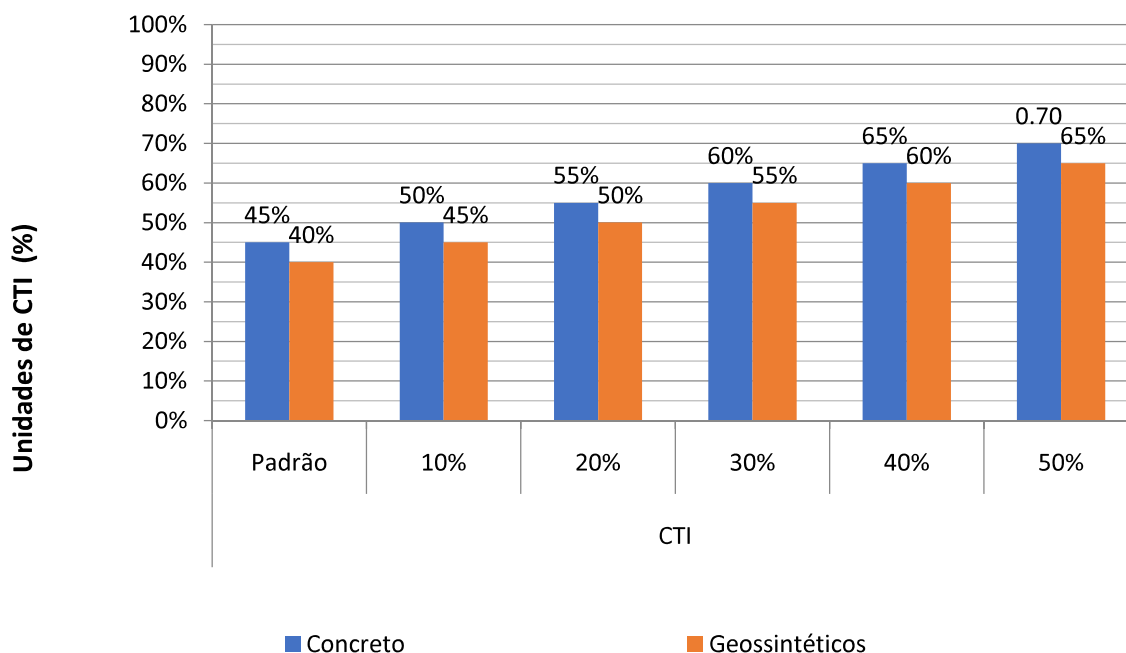


Figura 33 - Análise de cenários do CTI

Ao comparar os resultados das Figuras 33 e 32, o CTI apresenta valores de circularidade mais elevados, numa escala de 0% a 100%, e demonstra uma resposta linear e acentuada às aos incrementos de resíduos. Em contraste, o MCI exibe valores muito mais baixos, numa escala de 0 a 1, com um crescimento contido e uma diferenciação mínima entre os materiais avaliados, sugerindo uma menor sensibilidade a alterações dos materiais acréscimos dos reciclados.

Essa disparidade origina-se nas distintas filosofias de cálculo. O CTI baseia-se numa média ponderada pela massa dos fluxos de entrada (inflow) e saída (outflow) circulares, o que o torna uma ferramenta eficaz para medir o desempenho operacional em "fechar os ciclos" de materiais (Moss *et al.*, 2022). Por outro lado, o MCI incorpora um "Fator de Utilidade" que ajusta a pontuação com base na vida útil e na intensidade de uso do produto em comparação com uma média da indústria (EMF, 2015). Este fator limita a pontuação final, penalizando produtos que, embora recicláveis, não demonstram uma longevidade ou eficiência de uso superior, focando-se assim em "desacelerar os ciclos" e na qualidade do design.

Conclui-se que os indicadores não são contraditórios, mas sim complementares, respondendo a diferentes questões estratégicas sobre a circularidade. O CTI funciona como um indicador de desempenho operacional, ideal para monitorar o progresso na gestão de compras de materiais secundários e na eficiência da recuperação pós-uso. Em

contrapartida, o MCI atua como uma métrica de ecodesign e durabilidade, avaliando a circularidade intrínseca de um produto e sua capacidade de reter valor ao longo do tempo (D-FINE, 2022). A escolha entre eles, ou a sua utilização conjunta, depende do objetivo da análise: otimizar processos de fluxos de massa (CTI) ou avaliar e aprimorar o design do produto para uma longevidade e eficiência superiores (MCI).

A engenharia civil, reconhecida por suas profundas implicações para as mudanças climáticas, requer avaliações ambientais abrangentes para mitigar emissões e impactos associados. Neste contexto, a aplicação de uma avaliação ambiental para este setor é de suma importância. Uma ACV sobre Estruturas de Solos com geogrelha e geossintéticos, além de Estrutura Tradicional em Concreto foi realizada para avaliar seu os impactos ambientais dessas estruturas.

Em resumo, as principais atividades deste estudo consistiram em quantificar os impactos ambientais de Estruturas de Solos Reforçadas com geossintéticos e Estrutura de Gravidade. Os cálculos foram realizados usando o software OpenLCA que permite escolher o método ReCiPe 2016 e também a seleção de categorias de impacto, além de fornecer suporte para modelagem do ciclo de vida das estrutura. Os dados de inventário para as Estruturas de Solos Reforçadas com geossintéticos foram obtidos de empresas da área, enquanto os dados da Estrutura Tradicional em Concreto foram obtidos da literatura técnica de periódicos relevante da área de contenção de solos. A análise verificou os impactos ambientais em sete categorias de impacto de ponto médio. Adicionalmente, foram realizadas análises da incorporação de vegetação como substituição ao concreto na face das Estruturas de Solos Reforçadas com geossintéticos. Adicionalmente, foram realizadas análises da circularidade dos geossintéticos e do concreto.

Este estudo mostrou que a etapa construção das três estruturas de contenção de solos foi o processo mais recorrente, seguido etapa fabricação para os impactos ambientais. Em relação aos impactos relativos, em todas as categorias de impacto, as Estruturas de Solos Reforçadas com geossintéticos apresentaram menores impactos ambientais em comparação com Estrutura Tradicional. Em relação aos resultados com a incorporação de vegetação na face em substituição ao concreto, os resultados indicaram que a aplicação de vegetação pode reduzir o potencial em todas as categorias analisadas.

Os resultados do presente estudo podem inferir que as Estruturas de Solos Reforçadas com geogrelha e geotêxtil são mais sustentáveis quando comparadas com as Estruturas em concreto. Além disso, a análise de circularidade dos principais constituintes das três estruturas mostrou que, à medida que materiais reciclados foram adicionados para substituir materiais virgens, o MCI aumentou, mostrando vantagens na reciclagem dos materiais.

#### 4.2.4. Potenciais de Impactos variando as alturas

A seguir, são apresentadas as Figuras 34, 35 e 36 referentes aos insumos que poderiam ter as maiores influências

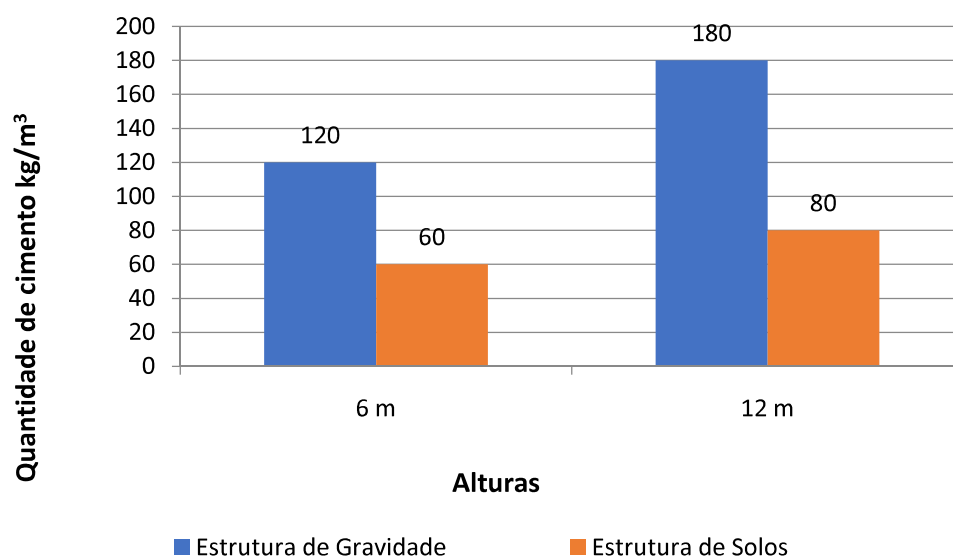


Figura 34 – Quantidade de cimento em função das alturas das estruturas

A Figura 34, que detalha a quantidade de cimento, fornece uma explicação material para a superioridade ambiental das Estruturas de Solos, ilustrando a massiva dependência de cimento das Estruturas de Gravidade. Esta observação valida a afirmação de Morsy e Thakeb (2022) de que as estruturas tradicionais exigem "grandes quantidades de concreto". A elevada quantidade de cimento, a principal responsável pelas emissões do concreto, sendo a possível a causa raiz do maior impacto ambiental dessas estruturas, uma conclusão quantificada por Giri e Reddy (2015) e que reforça a maior sustentabilidade das Estruturas de Solos, conforme sugerido por Lee (2025).

Adicionalmente, a Figura 34 demonstra que a quantidade de cimento aumenta com a altura para ambos os sistemas, alinhando-se à tendência geral de impactos

observada por Damians *et al.* (2015; 2016). O ponto crucial, no entanto, é o crescimento desproporcional do consumo na Estrutura de Gravidade, um reflexo da necessidade de mais massa e materiais para garantir a estabilidade em alturas maiores, como discutido por Zastrow *et al.* (2017). Em contraste, a eficiência do projeto das Estruturas de Solos, destacada por Heerten (2012), permite um aumento mais controlado no uso de materiais, provando que sua vantagem em sustentabilidade se torna ainda mais pronunciada em projetos de grande escala.

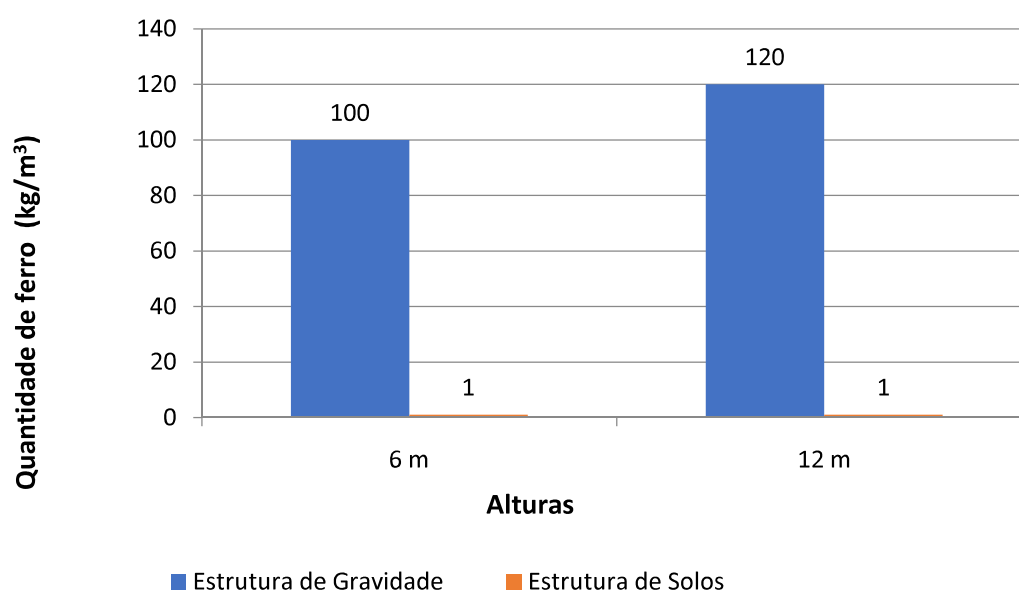


Figura 35 – Quantidade ferro função em das alturas das estruturas

A Figura 35, ao apresentar o consumo de aço em  $\text{kg/m}^3$ , ilustra a altíssima intensidade de uso deste material na Estrutura de Gravidade ( $100\text{-}120 \text{ kg/m}^3$ ) em contraste com sua presença quase nula na Estrutura de Solos (próximo de  $1 \text{ kg/m}^3$ ). Esta taxa elevada valida as conclusões de Rafalko (2010) e Zastrow *et al.* (2017), que identificam o aço como um componente estrutural primário e uma fonte crítica de impacto ambiental em projetos tradicionais. A taxa mínima na Estrutura de Solos demonstra o princípio da substituição de materiais, onde os geossintéticos substituem os reforços metálicos, uma vantagem central discutida por Heerten (2012) e Lee (2015).

De forma crucial, a Figura 35 mostra que a taxa de aço por metro cúbico na Estrutura de Gravidade aumenta com a altura, uma confirmação visual precisa da descoberta de Zastrow *et al.* (2017) de que estruturas tradicionais mais altas se tornam ainda mais dependentes do aço. Essa ineficiência de escalabilidade contrasta com a Estrutura de Solos, cujo uso de aço é residual e constante. A drástica redução na

intensidade do uso de aço é um fator decisivo para a maior sustentabilidade da Estrutura de Solos, dado que o aço é um dos principais contribuintes para os impactos ambientais na construção, como aponta Giri e Reddy (2015).

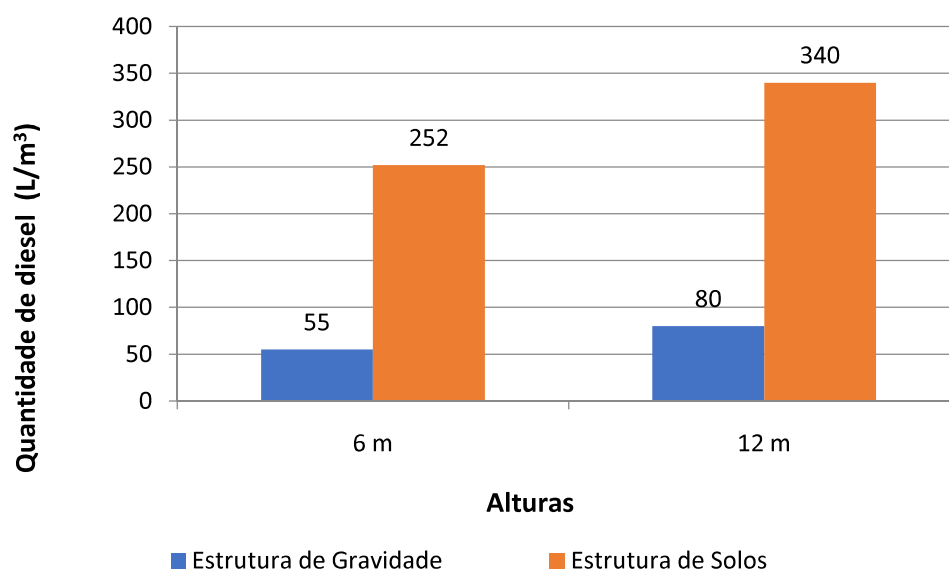


Figura 36 – Consumo de diesel em função em das alturas das estruturas

A Figura 36 apresenta uma inversão de tendência, mostrando que a Estrutura de Solos possui um consumo de diesel por metro cúbico significativamente mais alto que a Estrutura de Gravidade. Este fato é diretamente explicado pela literatura de base, que afirma que os impactos das Estruturas de Solos "podem ser muito influenciadas por máquinas, pois usam diesel principalmente para compactação de camadas e aterro". Portanto, o gráfico isola o impacto da fase construtiva, na qual o método de execução da Estrutura de Solos é mais intensivo no uso de maquinário.

Apesar de o consumo de diesel ser o principal ponto fraco ambiental da Estrutura de Solos, este impacto deve ser analisado no contexto geral. A conclusão dos estudos é que a massiva redução nos impactos associados aos materiais — como o alto volume de cimento (Morsy e Thakeb, 2022) e de aço (Zastrow *et al.*, 2017) nas estruturas tradicionais — supera o aumento do impacto gerado pelo maquinário. O aumento do consumo de diesel com a altura segue a tendência geral de escalabilidade de impactos notada por Damians *et al.* (2015; 2016), reforçando que a análise de sustentabilidade deve considerar as trocas entre os impactos incorporados nos materiais e os impactos da fase de construção.

#### 4.3 Considerações sobre a seção de resultados e discussão

Diversos estudos corroboram a hipótese de que Estruturas de Solos Reforçadas com geossintéticos são ambientalmente mais sustentáveis que as estruturas tradicionais. A pesquisa de Morsy e Thakeb (2022) aponta que as Estruturas de Solos Reforçadas com geossintéticos emitem menos CO<sup>2</sup> por demandarem menos concreto, uma visão reforçada por Damians *et al.* (2015) e Damians *et al.* (2016), que observaram menores impactos ambientais ao usar materiais alternativos. O trabalho de Lee (2025) também sugere que Estruturas de Solos Reforçadas com geogrelhas ou tiras de aço causam menos danos ambientais que estruturas de concreto. Heerten (2012) quantificou essa vantagem, demonstrando reduções significativas na demanda de energia e nas emissões de carbono. Comparando os reforços, Lee (2015) verificou que a produção de geogrelhas consome cerca de 20% menos energia que a de fitas de aço, e Rafalko (2010) destacou a notável eficiência das Estruturas de Solos Reforçadas com geossintéticos, sugerindo que o uso de materiais recicláveis aumentaria ainda mais sua sustentabilidade.

Adicionalmente, é possível observar que o concreto e o aço são os principais vilões ambientais nas estruturas convencionais, como apontado por Giri e Reddy (2015). Rafalko (2010) e Zastrow *et al.* (2017) especificam que o aço eleva drasticamente os impactos, especialmente em estruturas de concreto armado mais altas. Como contraponto, a análise da circularidade ganha importância, com Luthin e Crawford (2023) e Kadawo *et al.* (2023) mostrando que o uso de concreto reciclado pode aumentar a circularidade e reduzir significativamente os impactos. Contudo, os resultados não podem ser generalizados, mas podem ser replicados em locais com características próximas. Estudos como os de Damians *et al.* (2015; 2016) e Lee e Basu (2025) ressaltam que fatores locais como tipo de solo, matriz energética e distância de transporte são cruciais e podem alterar os resultados. Essa limitação, observada em um corpo de pesquisa que inclui Pons *et al.* (2018), Jones (2002) e Stucki *et al.* (2012), indica a necessidade de estudos futuros para expandir a aplicação dessas conclusões a diferentes realidades.

## 5. CONCLUSÃO

A metodologia Avaliação do Ciclo de Vida empregada neste estudo permitiu uma análise quantitativa e qualitativa dos impactos ambientais das diferentes soluções de muros de contenção. Assim, este estudo demonstrou que a construção de Estruturas de Solos Reforçadas com geossintéticos exigiu significativamente menos concreto e mais solo do que a construção de uma Estrutura Convencional de concreto. Isso destaca o benefício ambiental devido à priorização do solo como o componente primário em relação ao concreto. Além disso, a análise de circularidade demonstrou a importância de substituir materiais virgens por materiais reciclados.

Por meio das análises de Avaliação do Ciclo de Vida em conjunto com a análise de circularidade, foi possível observar que:

- Dentre os quatro processos, o que mais contribuiu foi o processo de construção, seguido pelo processo de fabricação, tanto na Estrutura de Concreto quanto nas duas Estruturas de Solos Reforçadas com geossintéticos. Essa predominância da fase de construção se explica por motivos distintos para cada tipologia: na estrutura tradicional, o impacto é impulsionado pelo imenso volume de concreto aplicado na obra, enquanto nas estruturas de solos reforçados, a causa principal é o uso intensivo de maquinário movido a diesel para a compactação das camadas de solo. A etapa de fabricação figura como a segunda mais impactante devido, principalmente, à produção de cimento para a estrutura de concreto — um processo de alta intensidade energética — e, em menor grau, à manufatura dos geossintéticos e dos painéis de concreto da face para as estruturas alternativas.

- Ao comparar a Estrutura tradicional com as Estruturas de Solos Reforçadas com geossintéticos, houve reduções significativas em todas as categorias. Exceto para a categoria de MC, que diminuiu entre 50% e 85%, as demais categorias EAD, THNC, EM, ERM, FCOT e AT registraram perdas de pelo menos 80% nos quatro processos verificados.

- A incorporação de vegetação em substituição ao concreto na face das duas Estruturas de Solos apresentou reduções em todas as categorias de impacto, com destaque para a categoria de MC, que teve perda de pelo menos 50%. As categorias EAD, THNC, EM, ERM, FCOT e AT tiveram perdas de 10% a 70%. O processo de manutenção apresentou a redução mais significativa.

- A análise do MCI mostrou um aumento de 250% para as duas Estruturas de Solos com geossintéticos e 300% para a Estrutura em concreto ao atingir 50% de materiais reciclados acrescidos em substituição aos virgens. No entanto, ao comparar esses resultados com os do indicador Circular Transition Indicators (CTI), observou-se uma diferença notável: enquanto o CTI apresentou valores de circularidade mais elevados e uma resposta mais acentuada aos incrementos de resíduos, o MCI exibiu valores mais contidos e menor diferenciação entre os materiais. Essa disparidade se origina nas diferentes abordagens de cálculo: o CTI foca nos fluxos de massa de entrada e saída, funcionando como uma métrica de desempenho operacional, enquanto o MCI incorpora um "Fator de Utilidade" que considera a durabilidade e a intensidade de uso do produto, atuando mais como uma métrica de ecodesign. Portanto, os indicadores são complementares, avaliando diferentes aspectos estratégicos da circularidade.

Em relação às avaliações qualitativas, vários agentes químicos podem ser liberados para o ar devido ao processo de fabricação e execução, principalmente de devido ao uso de cimento e concreto, e em uma extensão muito menor da utilização dos geossintéticos. Por exemplo, dióxido de carbono, dióxido de enxofre e óxidos nitrosos podem ser emitidos na atmosfera durante os processos de fabricação e execução, especialmente em concreto para Estrutura de Gravidade em concreto. As mesmas emissões podem ocorrer no processo de manutenção e fim-de-vida; no entanto, podem ocorrer em menor escala.

A análise da variação de alturas revelou que a superioridade ambiental das estruturas de solos reforçados é impulsionada pela drástica redução no consumo de cimento e aço. Apesar de um maior consumo de diesel na construção das estruturas de solo, esse impacto é significativamente compensado pela minimização dos impactos incorporados nos materiais, confirmando que a vantagem da sustentabilidade se acentua em projetos de maior escala.

Portanto, este estudo concluiu que o projeto de estruturas alternativas, como as Estruturas de Solos Reforçadas com geossintéticos, pode mitigar os potenciais impactos ambientais do setor da construção civil, que é um dos setores que mais consome recursos naturais e causa grandes emissões de gases poluentes. Além disso, o presente estudo pode auxiliar gestores e construtores, de locais com características semelhantes àqueles locais onde este estudo foi aplicado, principalmente na área geotécnica, a optarem por estruturas ambientalmente mais sustentáveis.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção o objetivo foi descrever algumas possíveis lacunas que podem ser preenchidas com outros trabalhos. A exemplo de três que estão descritos, seguir:

- Avaliação do Ciclo de Vida Comparativa entre Diferentes Muros de Gravidade e Muros de Flexão. Neste trabalho futuro poderia ser expandida a análise comparativa para incluir outras tipologias de muros. A investigação permitiria verificar se a superioridade ambiental das estruturas de solos reforçados se mantém frente a essas outras alternativas, que possuem diferentes perfis de consumo de materiais e processos construtivos. Tal estudo resultaria em um complemento para a presente tese, permitindo uma tomada de decisão mais assertiva, considerando um grupo mais vasto de soluções de engenharia.
- Avaliação do Ciclo de Vida com viés socioeconômico e social entre estruturas de solos reforçados com face e com face vegetal. Nesta outra pesquisa poderia ser aplicada a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida Social (ACV-S) e de Custo do Ciclo de Vida (LCC) ao caso específico da comparação entre estruturas de solos reforçados com face de concreto e aquelas com face vegetal. Poderiam ser explorados não apenas o custo inicial de construção, mas também os custos de manutenção ao longo de 50 anos, considerando as diferentes naturezas das intervenções (reparos pontuais de alto impacto no concreto versus manutenção contínua e de baixo impacto na vegetação). Além disso, poderiam ser investigadas a geração de empregos e a segurança e saúde do trabalhador.
- Análise de Indicadores da Economia Circular de Muros de Contenção de Solos. Nesta última sugestão de trabalhos futuros poderia ser desenvolvido um indicador de circularidade específico para muros de contenção. Tal indicador poderia incorporar a demolição e reuso dos materiais das estruturas, eficiência na separação dos materiais e qualidade do material reciclado, além da circularidade dos materiais.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14044: Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida: Requisitos e Orientações**, 46. Rio de Janeiro, 2009b.

ABRAINC. **PIB da Construção avança 4,1% no acumulado de 2024**. (2024) Disponível em: <https://www.abrainc.org.br/economia/2024/12/03/pib-da-construcao-avanca-41-no-acumulado-de-2024>. Acesso em: 20 jul. 2025.

ACERBI, F. TAISCH, M. **A literature review on circular economy adoption in the manufacturing sector**. Journal of Cleaner Production, p. 123086, 2020.

AHMED, N.; ABDEL-HAMID, M.; ABD EL-RAZIK, M.M.; EL-DASH, K.M. **Impact of sustainable design in the construction sector on climate change**. Ain Shams Eng. J. **2021**, 12, 1375–1383.

ALLEN, S. & SPRAGUE, C. J. **Carbon footprint implications of the erosion control response**. *Proceedings* 24th Annual GRI Conference: Optimizing Sustainability Using Geosynthetics, Dallas, TX, USA. The Geosynthetic Institute, Philadelphia, PA, USA, pp. 86–93, 2011.

ALVES-MAZZOTTI, A. J.; GEWANDSZNAJDER, F. **O método nas ciências naturais e sociais**. São Paulo: Pioneira, 1998.

ARAÚJO, M. G. **Modelo de avaliação do ciclo de vida para a gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos no Brasil**. 2013. Tese (Programa Pós-Graduação em Planejamento Energético) Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10318: Geossintéticos - Termos e Definições**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682: Estabilidade de Taludes**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17100-1: Gerenciamento de resíduos - Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

AYMARD, V.; BOTTA-GENOULAZ, V. **Normalisation in life-cycle assessment: Consequences of new European factors on decision-making.** *Supply Chain. Forum Int. J.* 2017, 18, 76–83.

BALASBANEH, A. T, BIN MARSONO A K. **Applying multi-criteria decision-making on alternatives for earth-retaining walls : LCA , LCC , and S-LCA.** *Int. J. Life Cycle Assess.* 2140–2153, 2020.

BALASBANEH, A. T., YEOH, D., JUKI, M. I., IBRAHIM, M. H. W., & ABIDIN, A. R. Z. **Assessing the life cycle study of alternative earth-retaining walls from an environmental and economic viewpoint.** *Environmental Science and Pollution Research*, 28(28), 37387–37399, 2021.

BARBOSA JÚNIOR, I.D.O.; MACÊDO, A.N.; MARTINS, V.W.B. **Construction Industry and Its Contributions to Achieving the SDGs Proposed by the UN: An Analysis of Sustainable Practices.** *Buildings* 2023, 13, 1168.

BATHURST, R. **Challenges and recent progress in the analysis, design and modelling of geosynthetic reinforced soil walls**, the 5th Giroud lecture. 10th International Conference on Geosynthetics, 10 ICG, Berlin, Germany, Ziegler, M., Braü, G., Heerten, G. and Laackmann, K. Editor, Deutsche Gesellschaft Fuer Geotechnik (DGGT), Essen, Germany, pp. 180–218, 2014.

BENTO, R. R. **Análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado: Uso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no processo decisório do dimensionamento.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, 2016.

BERTOZZI, C. **How is the construction sector perceiving and integrating the circular economy paradigm? Insights from the Brussels experience.** *City, Cult. Soc.* 2022, 29, 100446.

BIZJAK, K. F., & LENART, S. **Life cycle assessment of a geosynthetic-reinforced soil bridge system – A case study.** *Geotextiles and Geomembranes*, 46(5), 543–558, 2018.

BIZJAK, K. F., KNEZ, F., LENART, S., & SLANC, K. **Life-cycle assessment and repair of the railway transition zones of an existing bridge using geocomposite materials.** *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(3), 331–344, 2016.

BRANDÃO, R.; EDWARDS, D.J.; HOSSEINI, M.R.; CRISTIANO, A.; MELO, S.; MACÊDO, A.N. **Reverse supply chain conceptual model for construction and demolition waste.** *Waste Manag. Res.* 2021, 39, 1341–1355.

BRÄNDSTRÖM, J., & SAIDANI, M. Comparison between circularity metrics and LCA: A case study on circular economy strategies. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133537>.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BUENO, B. S. & VILAR, O. M. (2015). **Propriedades, ensaios e normas**. In: VERTEMATTI, J. C. (coord.). Manual Brasileiro de Geossintéticos. Blucher, São Paulo, SP, 2 Ed.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO - CBIC. **Construção civil impulsiona economia nacional**.(2024). Disponível em: <https://cbic.org.br/construcao-civil-cresce-43-em-2024-e-impulsiona-economia-nacional/>. Acesso em: 20 jul. 2025.

CARNEIRO, José Ricardo da Cunha et al. **Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental: a importância da incorporação de aditivos químicos**. 2009.

Cheng, W., Dilanchiev, A., Mammadov, E., & Sun, W. (2024). **The impact of natural resource extensive on green economic growth policies**. Resources Policy. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104980>.

CHIZZOTTI, Antônio. **Pesquisa em Ciências humanas e Sociais**. 7. ed. São Paulo, Cortez, 2005.

COMISSÃO NACIONAL DE CLASSIFICAÇÃO (CONCLA). **CNAE 43: Serviços especializados para construção**. In: Cosmos: inteligência fiscal para o varejo.: Bluesoft, (2024). Disponível em: <https://cosmos.bluesoft.com.br/tabelas/cnae/43-servicos-especializados-para-construcao>. Acesso em: 23 jul. 2025.

COOK, D. J.; MULROW, C. D.; HAYNES, R. B. **Systematic Reviews: Synthesis of Best Evidence for Clinical Decisions**. Annals of Internal Medicine, v. 126, pp. 376-380, 1997.

CORREIA, N.S. ZORNBERG, J.G. **Strain distribution along geogrid-reinforced asphalt overlays under traffic loading Geotext**. Geomembranes, 2018.

CRAWFORD, R. B. **Life Cycle Assessment in the built environment**. London: Taylor and Francis, 2011.

CUOMO, S., MORETTI, S., D'AMICO, A., FRIGO, L. & AVERSA, S. **Modelling of geosynthetic-reinforced barriers under dynamic impact of debris avalanche**. Geosynthetics International, 27, No. 1, 65–78, 2020.

DAMIANS, I. P., BATHURST, R. J., ADROGUER, E. G., JOSA, A., & LLORET, A. **Environmental assessment of earth retaining wall structures.** Environmental Geotechnics, 4(6), 415–431, 2015

DAMIANS, I. P., BATHURST, R. J., ADROGUER, E. G., JOSA, A., & LLORET, A. **Sustainability assessment of earth-retaining wall structures.** Environmental Geotechnics, 5(4), 187–203, 2016.

Dervishaj, A., & Gudmundsson, K. (2024). From LCA to circular design: A **comparative study of digital tools for the built environment.** Resources, Conservation and Recycling. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107291>.

DEUS, RM; BATTISTELLE, RAG; SILVA, GHR **Resíduos sólidos no Brasil: contexto, lacunas e tendências.** Eng. Sanit. E Ambient. 2015 , 20 , 685–698.

D-FINE. How to measure circularity?: A comparison of leading circularity metrics. Frankfurt: d-fine, 2022.

DJADOUNI, H., TROUZINE, H., GOMES CORREIA, A., & MIRANDA, T. F. DA S. **Life cycle assessment of retaining wall backfilled with shredded tires.** The International Journal of Life Cycle Assessment, 2019.

DREYER, L., NIEMANN, A.L., HAUSCHILD, M.Z. **Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99. Does it matter which one you choose?** International Journal of Life Cycle Assessment v. 8 (4), pp. 191-200, 2003.

EC (European Commission) JRC (Joint Research Centre) IES (Institute for Environment and Sustainability). **ILCD International Reference Life Cycle Data System. General Guide for Life cycle Assessment – Detailed guidance.** 2010.

EHRlich, M. & BECKER, L. **Muros e Taludes de Solo Reforçado: projeto e execução.** Oficina de Textos, 2009.

ELGIE, A. R., SINGH, S. J., & TELESFORD, J. N. **You can't manage what you can't measure: The potential for circularity in Grenada's waste management system.** Resources, Conservation and Recycling, 164, 2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circularity Indicators - An Approach to Measuring Circularity – Methodology.** Acessado online: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/material-circularity-indicator>, 2019. Accessed em: Setembro de 2023.

Ellen Mac Arthur Foundation. **What is Circular Economy?** Acesso on-line: <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy/introduction/overview>, 2009. Acessado em: Setembro de 2023.

ERSHADI, M.; JEFFERIES, M.; DAVIS, P.; MOJTAHEDI, M. **Barriers to achieving sustainable construction project procurement in the private sector.** *Clean. Eng. Technol.* 2021, 3, 100125.

FAGONE, C.; SANTAMICONE, M.; VILLA, V. **Architecture Engineering and Construction Industrial Framework for Circular Economy: Development of a Circular Construction Site Methodology.** *Sustainability* 2023, 15, 1813. <https://doi.org/10.3390/su15031813>.

FENG, H.; ZHAO, J.; ZHANG, H.; ZHU, S.; LI, D.; THURAIRAJAH, N. **Uncertainties in whole-building life cycle assessment: A systematic review,** *Journal of Building Engineering*, Volume 50, 2022.

FINNVEDEN, G. et al. **Recent developments in Life Cycle Assessment.** *Journal of Environmental Management*, v. 91, p. 1-21, 2009.

FRISCHKNECHT, R; BÜSSER-KNÖPFEL, S; ITTEN, R; STUCKI, M; WALLBAUM, H. **Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus concrete retaining wall.** 18th. Int Conf Soil Mech Geotech Eng Challenges Innov Geotech ICSMGE 2013(3):1979–1982, 2013.

GEISSDOERFER, M. et al. **Business models and supply chains for the circular economy.** *Journal of cleaner production*, v. 190, p. 712-721, 2018.

GEISSDOERFER, M., SAVAGET, P., BOCKEN, N. M. P., HULTINK, E. J. "The Circular Economy - A new sustainability paradigm?", *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 757-768, 2017.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estruturas de Contenção: Muros de Arrimo.** FEUERJ, Rio de Janeiro, 2010.

GIORGI, S.; LAVAGNA, M.; WANG, K.; OSMANI, M.; LIU, G.; CAMPIOLI, A. **Drivers and barriers towards circular economy in the building sector: Stakeholder interviews and analysis of five European countries policies and practices.** *J. Clean. Prod.* 2022, 336, 130395.

GIRI R. K., REDDY K. R. **Sustainability assessment of two alternate earth-retaining structures.** *Geotech Spec Publ GSP 256:2836–2845*, 2015.

Global Footprint Network, Earth Overshoot Day. Acesso online: <https://www.footprintnetwork.org/our-work/earth-overshoot-day>, 2022. Acessado em: Março de 2024.

GOEDKOOP, M.; SCHRYVER, A. D.; OELE, M.. **Introduction to LCA with SimaPro 7.** Amersfoort: Product Ecology Consultants, 2008. 82 p.

GOMES. V. **Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros: Diretrizes e base metodológica.** 2003. 210 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da

Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2003.

GONÇALVES, J. F. (2016). **Estudo Numérico do Comportamento de Muros de Solo Reforçado com Geossintético**. São Paulo: Tese de mestrado Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

GONZ'ALEZ, A.; SENDRA, C.; HERENA, A.; ROSQUILLAS, M.; VAZ, D. **Methodology to assess the circularity in building construction and refurbishment activities**. *Resour. Conserv. Recycl. Adv.* 2021, 12, 200051.

GREENWOOD, J. H.; SCHROEDER, H. F. E.; VOSKAMP, W. (2012). **Durability of Geosynthetics**. CUR committee C 187– Building e Infrastructure, 295 p.

GUERRA, B. C. LEITE, F. "**Circular economy in the construction industry: An overview of United States stakeholders' awareness major challenges and enablers**", *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 170, pp. 105617, 2020.

GUINÉE, J.B.; HEIJUNGS, H.; HUPPES, G.; ZAMAGNI, A.; MASONI, P; BUONAMICI, R.; EKVALL, T.; RYDBERG, T. **Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future**. *Environmental science & technology*. 45. 90-6. 10.1021/es101316v, 2011.

HARMSEL, M. **Contribution of Sand Filled Geotextile Tubes to Decrease Carbon Footprint Emissions in Building Marine Structures**. 29-38, 2016.

HASSAN, S. **Impact of HRM on Employee's Performance**. *International Journal of Academic Research in Accounting, Finance and Management Sciences*, 6, 15-22, 2016.

HAUSCHILD, M. and BARLAZ, M. **LCA in Waste Management: Introduction to Principle and Method**. In: *Solid Waste Technology and Management*. Christensen, T. (ed) UK: Blackwell Publishing, John Wiley and Sons, 2011.

HEERTEN, G. **Reduction of climate-damaging gases in geotechnical engineering practic eusing geosynthetics**. *Geotextiles and Geomembranes*, 30, 43–49, (2012).

HÉLIAS, A.; ESNOUF, A.; FINKBEINER, M. **Consistent normalization approach for Life Cycle Assessment based on inventory databases**. *Sci. Total Environ.* 2019, 703, 134583.

HSUAN, Y. G.; SCHROEDER, H. F.; ROWE, K.; MÜLLER, W.; GREENWOOD, J.; CAZZUFFI, D.; KOERNER, R. M. (2008). **Long-term performance and lifetime prediction of geosynthetics**. Keynote Paper. In: *4TH EUROPEAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE*. Edinburgh. Anais. Edinburgh. 1 CD-ROM.

HUDDLESTONE, L.; TURNER, J.; EBORALL, H.; HUDSON, N.; DAVIES, M.; MARTIN, G. **Application of normalisation process theory in understanding implementation processes in primary care settings in the UK: A systematic review**. *BMC Fam. Pract.* 2020, 21, 52.

Ige, O., Olanrewaju, O., Duffy, K., & Collins, O. (2022). **Environmental Impact Analysis of Portland Cement (CEM1) Using the Midpoint Method**. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en15072708>.

IGS - SOCIEDADE INTERNACIONAL DE GEOSSINTÉTICOS (International Geosynthetics Society) disponível em: .Acesso em 10 Julho. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Agência de Notícias. PIB cresce 3,4% em 2024 e fecha o ano em R\$ 11,7 trilhões. Rio de Janeiro, 7 mar. 2025. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/42774-pib-cresce-3-4-em-2024-e-fecha-o-ano-em-r-11-7-trilhoes>. Acesso em: 20 jul. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Em 2023, serviços especializados batem recorde em participação no valor de obras e número de pessoas ocupadas. **Agência de Notícias IBGE**, 22 maio 2025. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/43455-em-2023-servicos-especializados-batem-recorde-em-participacao-no-valor-de-obras-e-numero-de-pessoas-ocupadas>. Acesso em: 23 jul. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Anual da Indústria da Construção**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

Kadawo, A.; SADAGOPAN, M.; DURING, O.; BOLTON, K.; NAGY, A. **Combination of LCA and circularity index for assessment of environmental impact of recycled aggregate concrete**. *J. Sustain. Cem.-Based Mater.* 2023, 12, 1–12.

KAEWUNRUEN, S. & MARTIN, V. **Life Cycle Assessment of Railway Ground-Borne Noise and Vibration Mitigation Methods Using Geosynthetics, Metamaterials and Ground Improvement**. *Sustainability*, 2018.

KAJA, N., & GOYAL, S. (2023). **Impact of construction activities on environment**. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, 10(1). <https://doi.org/10.29121/ijetmr.v10.i1.2023.1277>.

KALBUSCH, A. **Método para avaliação do impacto ambiental da substituição de equipamentos convencionais por equipamentos economizadores de água a partir da Avaliação do Ciclo de Vida**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2011.

KING , A.; BOUAZZA , J. R.; GNIEL , R. K.; ROWE , HH BUI **Serviceability design for geosynthetic reinforced column supported embankments Geotext. As geomembranas** , 2017.

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S.: **Guidelines for performing Systematic Literature**, 2007.

KLÖPFER, W.; GRAHL, B. **Life Cycle Assessment (LCA): A guide to best practice**. Weinheim: Wiley-VCH, 2014, 391.

KRAVCHENKO, M., PIGOSSO, D. C., MCALOONE, T. C. "**Towards the ex-ante sustainability screening of circular economy initiatives in manufacturing companies: Consolidation of leading sustainability-related performance indicators**", *J. Clean. Prod.*, vol. 241, 2019.

KRISTENSEN, H. S.; MOSGAARD, M. A. **A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability?** *Journal of Cleaner Production*, v. 243, p. 118531, 2020.

KROLL, C.; WARCHOLD, A.; PRADHAN, P. **Sustainable Development Goals (SDGs): Are we successful in turning trade-offs into synergies?** *Palgrave Commun.* **2019**, 5, 1–11.

Laroche, P. (2023). Impacts of Western lifestyles in a telecoupled world. . <https://doi.org/10.5463/thesis.18>.

LEAL, D., WINTER, M. G., SEDDON, R., & NETTLETON, I. M. **A Comparative Life Cycle Assessment of Innovative Highway Slope Repair Techniques**. *Transportation Geotechnics*, 100322, 2020.

LEE, M.; BASU, D. **Sustainability assessment of mechanically stabilized earth walls**. In *from Fundamentals to Applications in Geotechnics*; IOS Press: Amsterdam, The Netherlands, 2015.

LUND, S.; MADGAVKAR, A.; MANYIKA, J.; SMIT, S. What's next for remote work: An analysis of 2,000 tasks, 800 jobs, and nine countries. McKinsey Global Institute, p. 1-13, 2020.

LUTHIN, A.; CRAWFORD, R.H.; TRAVERSO, M. **Demonstrating circular life cycle sustainability assessment—a case study of recycled carbon concrete**. *J. Clean. Prod.* 2023, 433, 139853.

MACCAFERRI. **Case History: Passagem inferior do KM 15+100 BR – 101 Sul**. 2013. Disponível em: . Acesso em: 03 julho de 2022.

MADON, I., DREV, D., & LIKAR, J. **Long-term groundwater protection efficiency of different types of sanitary landfills: Model description.** *MethodsX*, 7, 100810, 2020.

MALIK, S.; FATIMA, F.; IMRAN, A.; CHUAH, L.F.; KLEMEŠ, J.J.; KHALIQ, I.H.; ASIF, S.; ASLAM, M.; JAMIL, F.; DURRANI, A.K. **Improved project control for sustainable development of construction sector to reduce environment risks.** *J. Clean. Prod.* 2019, 240, 118214.

MARTÍNEZ ROCAMORA, A.; SOLÍS-GUZMÁN, J.; MARRERO, M.; **Ecological footprint of the use and maintenance phase of buildings: maintenance tasks and final results.** *Energy Build* 155:339–351, 2017.

MAYER, M. **“What Are Environmental Problems Due to Population Growth?”** sciencing.com. Acesso online: <https://sciencing.com/environmental-problems-due-to-population-growth-8337820.html>. Acesso em: Março de 2024.

MBDC LLC - **Cradle to Cradle Products Innovation Institute.** *Mater. Health Assess. Methodol.* 2013, 88. Acesso online: [https://cdn.c2ccertified.org/resources/certification/standard/MTD\\_Material\\_Health\\_Assessment\\_FINAL\\_021522.pdf](https://cdn.c2ccertified.org/resources/certification/standard/MTD_Material_Health_Assessment_FINAL_021522.pdf). Acessado em: Março de 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). (2023). **Balanço Energético Nacional (2023).** Brasília: MME. Available: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Accessed: February 20, 2024.

MIRANDA, Rosana Teixeira. **Análise da gestão de fim de vida de módulos fotovoltaicos, utilizando o estudo de Análise do Ciclo de Vida (ACV) para comparar os impactos de duas estratégias de gestão de fim de vida.** 2019. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia de Energia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

MIYATA, Y. **Pesquisa e prática de paredes geossintéticas MSE: passado, presente e futuro (Palestra IGS Bathurst de 2023).** *Geosynth. Int.* 2025 , 32 , 62–81.

MOHRI, Y., MATSUSHIMA, K., YAMAZAKI, S., LOHANI, T.N., TATSUOKA, F. & TANAKA, T. **New direction for earth reinforcement: disaster prevention for earthfill dams.** *Geosynthetics International*, 16, No. 4, 246–273, 2009.

MOLINA-MORENO F, GARCÍA-SEGURA T, MARTÍ J. V., YEPES V. **Optimization of buttressed earth-retaining walls using hybrid harmony search algorithms.** *Eng Struct* 134:205–216, 2017.

MONGEON, P; PAUL-HUS, A. **The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis** *Scientometrics*, 106, pp. 213-228, 10.1007/s11192-015-1765-5 View Record in Scopus Google Scholar, 2016.

MORAGA, G. et al. **Circular economy indicators: What do they measure?** Resources, Conservation and Recycling, v. 146, p. 452–461, 2019.

MORSY, K.M.; THAKEB, H. **Comparative evaluation of the environmental impacts of geosynthetic Mechanically Stabilized Earth walls.** J. Clean. Prod. 2022, 374, 133912.

MORTON, S., PENCHEON, D. Y SQUIRES, N., **Sustainable Development Goals (SDGs), and their implementation**, doi: 10.1093/bmb/ldx031, Br. Med. Bull., 124, 81-90 (2019).

MOSS, Ellie et al. **Measuring Circularity for Capital Equipment: Gaps, challenges and recommendations for an evolving metrics landscape.** Version 1.0.: Platform for Accelerating the Circular Economy (PACE); U.S. Chamber of Commerce Foundation; Circle Economy, 2022.

MUELLER, K.G. et al. **Parameterised inventories for life cycle assessment: systematically relating design parameters to the life cycle inventory.** International Journal of LCA. v. 9. n. 4. p. 227-235, 2004.

MURRAY, A., SKENE, K., & HAYNES, K. **The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context.** Journal of Business Ethics, 2017, 140(3), 369–380 . doi:10.1007/s10551-015-2693-2.

NIERO, M.; HAUSCHILD, M.Z. **Closing the loop for packaging: Finding a framework to operationalize circular economy strategies.** Procedia CIRP 2017, 61, 685–690.

NOROUZI, M.; CHÀFER, M.; LUISA F. CABEZA, L. F.; JIMÉNEZ, L.; BOER, D. **Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis**, Journal of Building Engineering, Volume 44, 2021, 102704, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102704>.

OECD. **Forum 2016 Issues: International Collaboration.** 2016. Acesso online: <https://www.oecd.org/forum/issues/forum-2016-issues-international-collaboration.htm>. Acesso em: Janeiro de 2024.

O'GRADY, G., BRAJKOVICH, T.M. N., MINUNNO, R., CHONG, H.-Y., MORRISON. **"Circular Economy and Virtual Reality in Advanced BIM-Based Prefabricated Construction"**, *Energies*, pp. 1-16, 2010.

ONUBI, H. O. YUSOF, N. AND HASSAN, A. S. **"The moderating effect of client types on the relationship between green construction practices and health and safety performance"**, *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.*, vol. 27, no. 8, pp. 732-748, 2020.

PALMEIRA, Ennio Marques. Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

PAN, N. **Progresso da Pesquisa em Materiais de Construção Verdes na Engenharia Civil**. Ciência, Tecnologia, Engenharia, Química, Meio Ambiente, Prot. 2024 , 1 , 10.

PEDROSO, G. M. **Avaliação de ciclo de vida energético (ACVE) de sistemas de vedação de habitações**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

PERALTA, F. N. G. (2007). **Comparação de Métodos de Projeto para Muros de Solo Reforçado com Geossintéticos**. Pontifícia Universidade Católica do Rio De Janeiro.

PONS J. J., PENADÉS-PLÀ V, YEPES V, MARTÍ J. V. **Life cycle assessment of earth-retaining walls: an environmental comparison**. J Clean Prod 192:411–420, 2018.

POTTER, S. **Undertaking a Literature Review. Doing Postgraduate Research**, v. 4, n. 4, p. 411-429, 2004.

RAJA, J., DIXON, N., FOWMES, G., FROST, M., & ASSINDER, P. (2014). **Comparison of carbon dioxide emissions for two landfill capping layers**. Proceedings of the ICE - Engineering Sustainability, 167(5), 197–207, (2014).

RAJA, J; DIXON, N; FOWMES, G; FROST, M; ASSINDER, P. **Obtaining reliable embodied carbon values for geosynthetics**. Loughborough University. Journal contribution, 2015.

RATNASABAPATHY, S. ALASHWAL, A. AND PERERA, S. **"Investigation of waste diversion rates in the construction and demolition sector in Australia"**, *Built Environ. Proj. Asset Manag.*, 2020.

REICHERT, G. A. **Apoio à tomada de decisão por meio da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos: o caso de Porto Alegre**. Tese – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2013.

REIKE, D.; VERMEULEN, W.J.V.; WITJES, S. **The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0?—Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options**. Resour. Conserv. Recycl. 2018, 135, 246–264.

REINFORCED EARTH. Reinforced Earth: sustainable technology. [S.l.], 2014. Catálogo técnico. Dispon[ível em: [https://www.geoquest-group.com.br/wp-content/uploads/sites/8/2019/12/TA-TECHNIQUE\\_EN\\_V02.pdf](https://www.geoquest-group.com.br/wp-content/uploads/sites/8/2019/12/TA-TECHNIQUE_EN_V02.pdf). Acesso em: Julho de 2025.

REIS, D. **Fluxo de materiais e eficiência no uso de recursos na indústria da construção**, 2020. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2020.

RIBEIRINHO, M. J.; MISCHKE, J.; STRUBE, G.; SJÖDIN, E.; BLANCO, J. L.; PALTER, R. ... & ANDERSSON, T. *The next normal in construction: How disruption is reshaping the world's largest ecosystem*. McKinsey & Company: Zurich, Switzerland, 2020.

RIBEIRO, A. K. M. **Método para avaliação do impacto ambiental da implantação de sistemas integrados de aproveitamento de água pluvial e água cinza em residências unifamiliares a partir da análise do ciclo de vida**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2015.

RICO, S.G., ALENCAR, L.H. **Circular Economy Strategies in Civil Engineering: A Brief Literature Review**. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM 2021, pp. 901 – 905.

RIGAMONTI, L., MANCINI, E. **Life cycle assessment and circularity indicators**. In *International Journal of Life Cycle Assessment* (Vol. 26, Issue 10, pp. 1937–1942). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021.

ROCHA, B. F. M; MASSIMINO, B. M. **Solos reforçados com geossintéticos: obras de contenções de aterros de pontes e viadutos**. *Colloquium Exactarum*, Presidente Prudente, v. 11, n. 3, p. 121-131, jul./set. 2019. DOI: 10.5747/ce.2019.v11.n3.e291.

ROSSI, E. et al. **Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: Plastic, textile and electro-electronic cases**. *Journal of Cleaner Production*, v. 247, 2019.

RUIZ, E. F.; MOTA, G. M.; FORTEZA, A. L. **Solo reforçado com geogrelhas: Aplicações em obras de encontros de pontes e viadutos**, 2017.

RUIZ, E. F.; MOTA, G. M.; FORTEZA, A. L. Solo reforçado com geogrelhas: Aplicações em obras de encontros de pontes e viadutos. Disponível em: <http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/2017/12/CCO-2012-Solo-reforçado-com-geogrelhas-aplicações-em-obras-de-encontros-de-pontes-e-viadutos.pdf>. Acesso em: Julho de 2025.

SAADE, M. R. M. **Modelagem de multifuncionalidade aplicada a ACV de cimentos e concretos**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. – Campinas, SP, 2017.

SADAT, M.R. HUANG, J. BIN-SHAFIQUE, S. REZAEIMALEK, S. **Study of the behavior of mechanically stabilized earth (MSE) walls subjected to differential settlements** *Geotext. Geomembranes*, 2018.

SAIDANI, M. et al. **A taxonomy of circular economy indicators**. *Journal of Cleaner Production*, v. 207, p. 542–559, 2019.

SALIMIAN, S.; MOUSAVI, S.M.; TUPENAITE, L.; ANTUCHEVICIENE, J. **An Integrated Multi-Criteria Decision Model to Select Sustainable Construction Projects under Intuitionistic Fuzzy Conditions**. *Buildings*, 2023, 13, 848.

SALVIA, A.L.; LEAL FILHO, W.; BRANDLI, L.L.; GRIEBELER, J.S. **Assessing research trends related to Sustainable Development Goals: Local and global issues**. *J. Clean. Prod.* 2019, 208, 841–849.

SANTOS, D. V. **ANÁLISE TÉCNICA E FINANCEIRA DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO: UM ESTUDO DE CASO**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará – FORTALEZA, (2018).

SATYAL, S.R. LESHCHINSKY, B. HAN, J. NEUPANE, M. **Use of cellular confinement for improved railway performance on soft subgrades** *Geotext. Geomembranes*, 2018.

SEOL, Y., LEE, S., LEE, J. Y., HAN, J. G., & HONG, G. **Excavation Method Determination of Earth-Retaining Wall for Sustainable Environment and Economy: Life Cycle Assessment Based on Construction Cases in Korea**. *Sustainability*, 2021.

SHUKLA, S. K. **A study on causes of landslides in Arunachal Pradesh**. *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference*, Vadorara, India, pp. 613–616, 1997.

SLEESWIJK, A.W.; VAN OERS, L.F.; GUINÉE, J.B.; STRUIJS, J.; HUIJBREGTS, M.A. **Normalization in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000**. *Sci. Total Environ.* 2008, 390, 227–240.

SONNEMANN G. W., SCHUHMACHER M. and CASTELLS F. **Uncertainty Assessment By a Monte Carlo Simulation in a Life Inventory of Electricity Produced by a Waste Incinerator**. *Journal of Cleaner Production*, v. 11: p. 279–292. 2003.

SURESH, DHANASREE & CHAWLA, SOWMIYA. **Comparative life cycle assessment of railway subballast layer with natural and coal overburden aggregates in India**. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2022.

TAIT, M. W, CHEUNG, W. M. **A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of three concrete mix designs**. *Int J Life Cycle Assess* 21:847–860, 2016.

TARIQ, Z., VOLK, T. A., & THERASME, O. **Life cycle assessment of a shrub willow evapotranspiration cover compared with conventional clay and geosynthetic covers in Upstate New York.** *Environmental Science and Pollution Research*, 28(33), 45029–45040, 2021.

TAZI, N., IDIR, R., & BEN FRAJ, A. **Towards achieving circularity in residential building materials: Potential stock, locks and opportunities.** *Journal of Cleaner Production*, 281, 124489, 2021.

Thapa, I., Baral, N., & Adhikari, K. (2023). **Comprehensive review of LCA studies in Civil Engineering.** BIBECHANA. <https://doi.org/10.3126/bibechana.v20i3.58552>.

TOUZE-FOLTZ, N.; BANNOUR, H.; BARRAL, C. & STOLTZ, G. **A review of the performance of geosynthetics for environmental protection,** *Geotextiles and Geomembranes*, 44, 656-672, 2016.

TRINDADE, E., LIMA, L., ALENCAR, L.H., ALENCAR, M. **"Identification of Obstacles to Implementing Sustainability in the Civil Construction Industry using Bow-Tie Tool",** *Buildings*, vol. 10, pp. 165, 2020.

TURNER, D. A., BEAVEN, R. P., & WOODMAN, N. D. **Evaluating landfill aftercare strategies: A life cycle assessment approach.** *Waste Management*, 63, 417–431, 2017.

UMER, A., HEWAGE, K., HAIDER, H., & SADIQ, R. **Sustainability evaluation framework for pavement technologies: An integrated life cycle economic and environmental trade-off analysis.** *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, 88–101, 2017.

UNEP. **UNEP Frontiers 2016 Report: Emerging Issues of Environmental Concern;** United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya, 2016.

United Nations .THE 17 GOALS | Sustainable Development, 2015.

VADOUDI, K., DECKERS, P., DEMUYTERE, C., ASKANIAN, H., & VERNEY, V. (2022). **Comparing a material circularity indicator to life cycle assessment: The case of a three-layer plastic packaging.** *Sustainable Production and Consumption*, 33, 820–830.

VANDENBERGE, D. R. ESSER, A. J. BUMPAS, K. **An overview of sustainability applied to earth structures** *Proceedings of IFCEE, ASCE*, 2015.

VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos.** Ed. Bluncher: 2° ed. São Paulo, 2015. ISBN: 9788521209263.

Vieira, C.F.S. **Muros e Taludes de Solo Reforçado com Geossintéticos. Comportamento Sísmico e Metodologias de Dimensionamento.** Dissertação

apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, (2008a),575 p.

VILLALBA P, ALCALÁ J, YEPES V, GONZÁLEZ-VIDOSA F. **CO2 optimization of reinforced concrete cantilever retaining walls**. 2nd International Conference on Engineering Optimization, September, 6–9, 2010.

Wang, J., & Azam, W. (2024). **Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries**. *Geoscience Frontiers*. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101757>.

Wanzala, R., & Obokoh, L. (2024). **Savings and Sustainable Economic Growth Nexus: A South African Perspective**. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16208755>.

Wiesner, S., & Hauge, J. (2021). **Review of Factors Influencing Product-Service System Requirements Along the Life Cycle**. , 138-145. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85910-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85910-7_15).

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). *Indicadores de Transição Circular V2.0: Métricas para empresas desenvolvidas por empresas*.: WBCSD Portugal, 2021. Disponível em: [https://bcsdportugal.org/wp-content/uploads/2021/03/CTI\\_2\\_BCSD\\_VF.pdf](https://bcsdportugal.org/wp-content/uploads/2021/03/CTI_2_BCSD_VF.pdf). Acesso em: 2 set. 2025.

WRIGHT, R.W.; BRAND, R.A.; DUNN, W.; SPINDLER, K.P. **How to write a systematic review**. *Clinical Orthopaedics and related Research*, v. 455, p. 23-29, 2007.

YEPES V, MARTÍ J. V., GARCÍA-SEGURA T. **Cost and CO2 emission optimization of precast-prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm**. *AutomConstr* 49:123–134 (2015).

ZASTROW, P. MOLINA-MORENO, F. GARCÍA-SEGURA, T. MARTÍ, JV, YEPES, V. **Life cycle assessment of cost-optimized buttress earth-retaining walls: a parametric study**. *Journal of Cleaner Production*, v. 140, p. 1037-1048, (2017). doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.085.

ZASTROW, P.; MOLINA-MORENO, F.; GARCÍA-SEGURA, T.; MARTÍ, J.V.; YEPES, V. **Life cycle assessment of cost-optimized buttress earth-retaining walls: A parametric study**. *J. Clean. Prod.* 2017, 140, 1037–1048.

ZHANG, R., LONG, M., & ZHENG, J. **Comparison of Environmental Impacts of Two Alternative Stabilization Techniques on Expansive Soil Slopes**. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1–13, 2019.

## **ANEXOS**

### **ANEXOS A – PROCESSO DE ESCOLHA E SELEÇÃO DOS ARTIGOS**

#### **Anexos A1 – Strings de buscas**

As “strings” de buscas utilizadas foram ("Geosynthetic\*\*" and "Life cycle assessment"); (“Soil walls” or “Reinforced soil walls” and "Life cycle assessment"); ("Retaining structure" or "Containment structure\*\*" and "Life cycle assessment" and "Geosynthetics"); “Earth retaining wall” and "Life cycle assessment". Para um intervalo de tempo entre 2012 e 2024, nas bases de dados Web of Science, Scopus e Science Direct, sendo considerados apenas artigos de revista em Língua Inglesa.

#### **Anexos A2 – Processo de escolha dos artigos**

Assim, os critérios de inclusão para a seleção dos trabalhos sobre ACV em geossintéticos foram:

- Artigos que relacionassem ACV ambiental com geossintéticos;
- Artigos que aplicassem a metodologia de ACV em um estudo de caso com geossintéticos.

Com relação aos critérios de exclusão, foram excluídos trabalhos a partir dos seguintes parâmetros:

- Trabalhos que considerassem apenas ACVs sociais e econômicas, sem abordar o desempenho ambiental;
- Trabalhos que avaliassem apenas parâmetros mecânicos, hidráulicos e de resistência, sem abordar os potenciais impactos ambientais;
- Estudos que consideraram apenas outras revisões sistemáticas.

Para este estudo, as fontes selecionadas foram as bases: Web of Science, Scopus e Science Direct, pois segundo Mongeon e Paul-Hus (2016), são as bases de dados mais utilizadas para estudos nas áreas de Ciências Naturais e Engenharia.

Para a seleção dos trabalhos avaliados, decidiu-se incluir somente artigos científicos de revistas, excluindo capítulos de livros e artigos publicados em anais de eventos. Foram considerados artigos entre os anos de 2012 e 2024, foram selecionados artigos apenas em língua Inglesa.

Apesar do foco da tese estar na área de construção civil ou, mais especificamente, em Engenharia Civil, optou-se por não excluir artigos que tratavam de ACV em outros setores, uma vez que os problemas em discussão podem estar associados à outras áreas também.

Para auxiliar a revisão sistemática foi utilizado o programa Start, pois é uma ferramenta que pode auxiliar os autores, tornando esta tarefa menos desgastante.

A seleção dos estudos seguiu as quatro etapas descritas a seguir: Identificação, Seleção, Elegibilidade e Inclusão.

Para esta etapa de Identificação foram escolhidos termos de busca de maneira a possibilitar a replicação do estudo, nesta etapa foram definidas as bases de dados, as palavras-chave e o intervalo de tempo das publicações selecionadas para a realização da pesquisa. De maneira a selecionar o maior número de artigos, usaram-se operadores booleanos, caracteres especiais e palavras-chave nas buscas dos títulos, palavras-chave e resumos.

**Seleção:** Nesta etapa, os artigos foram selecionados nas bases de dados pré-estabelecidas, posteriormente os artigos duplicados foram excluídos, ficando com apenas uma cópia para as próximas etapas.

**Elegibilidade:** Os critérios de elegibilidade exigiram a leitura dos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos, e foi verificado se eles atendiam aos critérios de inclusão estabelecidos para esta revisão. Quando verificado que os estudos não se relacionavam com a Avaliação de Ciclo de Vida em Geossintéticos, seria excluído e em caso de dúvida passaria para a próxima etapa de leitura do mesmo artigo em análise.

**Inclusão:** Para a etapa de inclusão, os artigos foram lidos por completo e verificados se atendiam aos critérios de inclusão ou se enquadravam em algum critério de exclusão, deixando apenas aqueles que fariam parte da revisão. Esses artigos foram categorizados em grupos de acordo com suas contribuições para esta revisão. Por fim, os artigos foram selecionados para realizar as análises bibliométricas.

Para realização da análise bibliométrica foram utilizados os artigos selecionados da revisão sistemática.

A partir das buscas realizadas nas bases de dados: Scopus, Web of Science e Science Direct foram encontradas as seguintes quantidades 526, 714 e 5 para as bases de dados: Scopus, Web of Science e Science Direct, respectivamente, com um total de 1245 artigos de revista, sendo que deste somatório 93 eram artigos duplicados (Tabela 2).

Tabela 10 - Tabela dos artigos encontrados nas bases de dados

Bases de Dados	Scopus	Web of Science	Science Direct
Quantidade de Artigos	526	714	5
Duplicados	105		
Total	1350		

O processo de seleção ocorreu em duas etapas de filtragem dos artigos (Figura 37). Em uma primeira etapa foram realizadas as leituras dos títulos, resumos e palavras-chave, após a execução desta etapa foram obtidos 109 artigos. Em uma segunda etapa foram realizadas a leitura completa dos artigos selecionados na etapa anterior, nesta segunda etapa chegou-se a um total de 19 artigos.

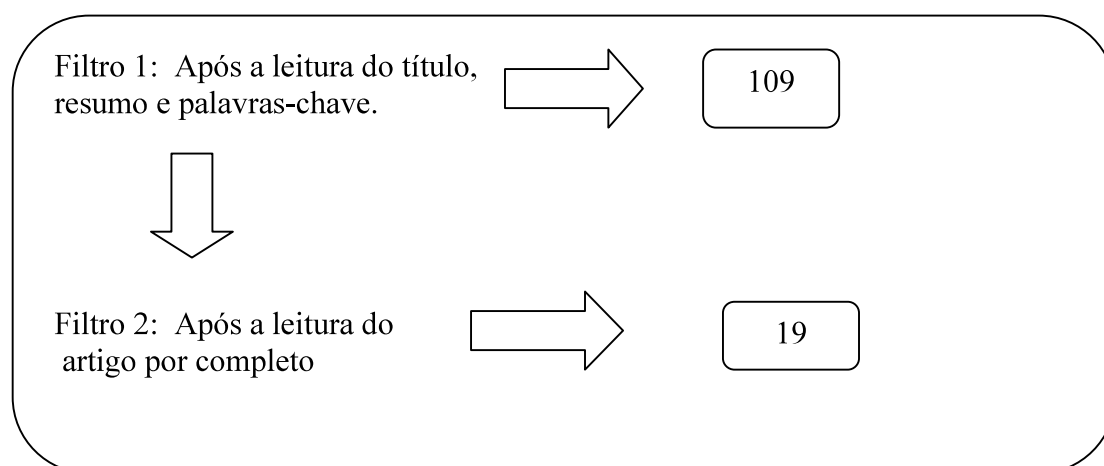


Figura 37 - Quantidade dos artigos após os processos de filtragem.

**ANEXO B – ARTIGOS SELECIONADOS NA REVISÃO SISTEMÁTICA (REFERÊNCIAS)**

**Artigo 1:** HEERTEN, G. **Reduction of climate-damaging gases in geotechnical engineering practice using geosynthetics.** *Geotextiles and Geomembranes*, 30, 43–49, (2012).

<https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2011.01.006>.

**Artigo 2:** RAJA, J., DIXON, N., FOWMES, G., FROST, M., & ASSINDER, P. (2014). **Comparison of carbon dioxide emissions for two landfill capping layers.** *Proceedings of the ICE - Engineering Sustainability*, 167(5), 197–207, (2014).

<https://doi.org/10.1680/ensu.14.00006>.

**Artigo 3:** DAMIANS, I. P., BATHURST, R. J., ADROGUER, E. G., JOSA, A., & LLORET, A. **Environmental assessment of earth retaining wall structures.** *Environmental Geotechnics*, 4(6), 415–431, 2015

<https://doi.org/10.1680/jenge.15.00040>.

**Artigo 4:** RAJA, J; DIXON, N; FOWMES, G; FROST, M; ASSINDER, P. **Obtaining reliable embodied carbon values for geosynthetics.** Loughborough University. Journal contribution, 2015.

<http://dx.doi.org/10.1680/gein.15.00020>.

**Artigo 5:** DAMIANS, I. P., BATHURST, R. J., ADROGUER, E. G., JOSA, A., & LLORET, A. **Sustainability assessment of earth-retaining wall structures.** *Environmental Geotechnics*, 5(4), 187–203, 2016.

<http://dx.doi.org/10.1680/jenge.16.00004>.

**Artigo 6:** BIZJAK, K. F., KNEZ, F., LENART, S., & SLANC, K. **Life-cycle assessment and repair of the railway transition zones of an existing bridge using geocomposite materials.** *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(3), 331–344, 2016.

<http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2016.1158288>.

**Artigo 7:** TURNER, D. A., BEAVEN, R. P., & WOODMAN, N. D. **Evaluating landfill aftercare strategies: A life cycle assessment approach.** *Waste Management*, 63, 417–431, 2017.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.005>.

**Artigo 8:** UMER, A., HEWAGE, K., HAIDER, H., & SADIQ, R. **Sustainability evaluation framework for pavement technologies: An integrated life cycle economic and environmental trade-off analysis.** *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, 88–101, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.011>.

**Artigo 9:** BIZJAK, K. F., & LENART, S. **Life cycle assessment of a geosynthetic-reinforced soil bridge system – A case study.** *Geotextiles and Geomembranes*, 46(5), 543–558, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2018.04.012>.

**Artigo 10:** KAEWUNRUEN, S. & MARTIN, V. **Life Cycle Assessment of Railway Ground-Borne Noise and Vibration Mitigation Methods Using Geosynthetics, Metamaterials and Ground Improvement.** Sustainability, 2018.  
doi:10.3390/su10103753.

**Artigo 11:** ZHANG, R., LONG, M., & ZHENG, J. **Comparison of Environmental Impacts of Two Alternative Stabilization Techniques on Expansive Soil Slopes.** *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1–13, 2019.  
<https://doi.org/10.1155/2019/9454929>.

**Artigo 12:** DJADOUNI, H., TROUZINE, H., GOMES CORREIA, A., & MIRANDA, T. F. DA S. **Life cycle assessment of retaining wall backfilled with shredded tires.** *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-018-1475-3>.

**Artigo 13:** LEAL, D., WINTER, M. G., SEDDON, R., & NETTLETON, I. M. A **Comparative Life Cycle Assessment of Innovative Highway Slope Repair Techniques.** *Transportation Geotechnics*, 100322, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100322>.

**Artigo 14:** BALASBANEH A T, BIN MARSONO A K. **Applying multi-criteria decision-making on alternatives for earth-retaining walls : LCA , LCC , and S-LCA.** *Int. J. Life Cycle Assess.* 2140–2153, 2020.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-020-01825-6>.

**Artigo 15:** MADON, I., DREV, D., & LIKAR, J. **Long-term groundwater protection efficiency of different types of sanitary landfills: Model description.** *MethodsX*, 7, 100810, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100810>.

**Artigo 16:** BALASBANEH, A. T., YEOH, D., JUKI, M. I., IBRAHIM, M. H. W., & ABIDIN, A. R. Z. **Assessing the life cycle study of alternative earth-retaining walls from an environmental and economic viewpoint.** *Environmental Science and Pollution Research*, 28(28), 37387–37399, 2021.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-13190-4>.

**Artigo 17:** TARIQ, Z., VOLK, T. A., & THERASME, O. **Life cycle assessment of a shrub willow evapotranspiration cover compared with conventional clay and geosynthetic covers in Upstate New York.** *Environmental Science and Pollution Research*, 28(33), 45029–45040, 2021.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-13901-x>.

**Artigo 18:** SURESH, DHANASREE & CHAWLA, SOWMIYA. **Comparative life cycle assessment of railway subballast layer with natural and coal overburden aggregates in India.** *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2022.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-022-02060-x>.

**Artigo 19:** Morsy, K.M.; Thakeb, H. Comparative evaluation of the environmental impacts of geosynthetic Mechanically Stabilized Earth walls. *J. Clean. Prod.* 2022, 374, 133912.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133912>

**ANEXO C - DADOS CLIMATOLÓGICOS RELATIVOS AO ANO DE 2024.**

<b>Mês</b>	<b>Temperatura Média Compensada (°C)</b>	<b>Temperatura Máxima Média (°C)</b>	<b>Temperatura Mínima Média (°C)</b>	<b>Precipitação Acumulada (mm)</b>	<b>Umidade Relativa Média (%)</b>	<b>Velocidade Média do Vento (m/s)</b>
Janeiro	23.5	28.8	19.2	295.40	82	2.1
Fevereiro	23.8	29.5	19.5	241.30	80	2.0
Março	22.9	28.6	18.4	185.70	78	1.9
Abril	21.5	27.8	16.5	75.50	71	2.2
Maio	19.4	26.2	13.8	58.90	68	2.4
Junho	18.6	25.8	12.5	31.10	64	2.5
Julho	18.2	26.1	11.9	25.80	61	2.6
Agosto	20.5	28.5	13.5	15.40	55	2.8
Setembro	22.8	31.2	15.6	1.20	48	3.1
Outubro	23.1	30.5	17.8	112.30	65	2.7
Novembro	22.7	28.9	18.5	236.80	75	2.3
Dezembro	22.1	27.4	18.8	314.80	84	2.2
Anual	21.6	28.3	16.3	1594.20	70	2.4

**Fonte:** Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) – 2024.

## ANEXO D – DADOS PARA MODELAGEM POR ETAPA DAS ESTRUTURAS.

### Anexos D1 – Materiais para a etapa de fabricação

Materiais selecionados para a produção de 1kg dos recursos principais usado nas estruturas de contenção.

Material	Unidades	Concreto	Geogrelha	Geotêxtil Tecido
Matéria-prima	kg	1,1	1,01	1,05
Aditivo superplastificante	kg	0,0011	-	-
Água	kg	0,072	0,90	1,1
Eletricidade	kWh	1,1	0,80	0,85
Diesel Maquinário	L	0,2	0,15	0,18
Uso da fábrica para produção	m <sup>2</sup>	8×10 <sup>-4</sup>	5×10 <sup>-4</sup>	5×10 <sup>-4</sup>
Resíduos gerados após a fabricação	k	0,11	0,50	0,5
Transportes	tkm	0,09	0,29	0,30

### Anexos D2 – Materiais para etapa de construção

Materiais necessários para a construção de 1m<sup>3</sup> de estruturas de contenção.

Material	Unidades	Concreto	Geogrelha	Geotêxtil Tecido
Concreto	kg	2400	-	-
Lastro de Concreto	Kg	-	240	240
Eletricidade	kWh	200	150	150
Pedra	Kg	1100	1100	1100
Tubulação	m	3	1,8	1,8
Diesel	L	50	250	250
Geossintético	Kg	-	19,6	8,8
Madeira	kg	30	7	7
Escavação da base	kg	1800	300	300
Compactação da base	h	0,9	0,15	0,15
Compactação das camadas	h	-	1,2	1,2
Instalação dos geossintéticos	h	-	0,4	0,6
Água	kg	170	260	260
Revestimento da face	kg	-	240	240
Instalação do revestimento	h	-	0,04	0,04
Impermeabilização (Betume)	kg	3,5	-	-
Uso da Terra	m <sup>2</sup>	0,9	0,5	0,5
Resíduos gerados após a construção	kg	360	5	5
Transporte	tkm	744,64	147,83	147,82

**Anexos D3 – Materiais para etapa de manutenção**Materiais necessários para a manutenção de 1m<sup>3</sup> de estruturas de contenção

<b>Material</b>	<b>Unidades</b>	<b>Concreto</b>	<b>Geogrelha</b>	<b>Geotêxtil Tecido</b>
Concreto	kg	200	-	-
Eletricidade	kWh	15	10	10
Água	kg	13	5	5
Diesel para Maquinário	L	5	3	3
Madeira	kg	5	-	-
Geossintéticos	m <sup>2</sup>	-	-	-
Revestimento da face	Kg	-	120	120
Compactação de solos	h	0,9	0,6	0,6
Resíduos gerados após manutenção	kg	15	3	3
Transporte	tkm	5,81	3,68	3,68

## ANEXO E – MEMORIAL DE CÁLCULO DA ESTRUTURA ECM CONCRETO E DA ESTRUTURA DE SOLOS REFORÇADOS COM GEOSSINTÉTICOS

### Anexos E1 - Memorial de Cálculo da Estrutura Convencional.

#### Parâmetros de Projeto

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Peso Específico do Concreto	$\gamma_c$	25	kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico do Solo	$\gamma_s$	18	kN/m <sup>3</sup>
Ângulo de Atrito do Solo	$\phi$	30	Graus
Coefficiente de Atrito Solo-Concreto	$\mu$	0,60	Adimensional
Tensão Admissível do Solo	$\sigma_{adm}$	200	kPa
Altura Total do Muro	H	6,00	m
Largura da Base	B	3,70	m

#### Forças Verticais e Momentos Estabilizantes (Ponto de Rotação)

Componente	Figura	Dimensões (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Braço (x) (m)	Peso (P) (kN/m)	Momento (Mr) (kNm/m)
1 (Base)	Retângulo	3,70 x 0,50	1,850	1,85	46,25	85,56
2 (Fuste-Ret.)	Retângulo	0,50 x 5,50	2,750	2,85	68,75	195,94
3 (Fuste-Tri.)	Triângulo	2,10 x 5,50	5,775	1,90	144,38	274,31
4 (Solo)	Retângulo	0,60 x 5,50	3,300	3,40	59,40	201,96
Total	-	-	13,675	-	$\sum V=318,78$	$\sum Mr=757,77$

#### Forças Horizontais e Momentos Desestabilizadores

- Coeficiente de Empuxo Ativo ( $K_a$ )

$$K_a = \tan^2(45 - \phi/2) = \tan^2(45 - 30^\circ/2) = 0,333.$$

- Força de Empuxo Ativo ( $E_a$ )

$$E_a = 0,5 \times K_a \times \gamma_s \times H^2 = 0,5 \times 0,333 \times 18 \times 6,00^2 = 108,0 \text{ kN/m}$$

- Momento de Tombamento ( $M_t$ )

$$M_t = E_a \times (H/3) = 108,0 \times (6,00/3) = 216,0 \text{ kNm/m}$$

#### VERIFICAÇÕES DE ESTABILIDADE GLOBAL

##### Segurança ao Tombamento

- $F_{St} = \sum Mr / \sum Mt = 757,77 / 216,0 = 3,51$
- Critério:  $F_{St} \geq 2,0$

- Resultado:  $3,51 \geq 2,0 \Rightarrow$  **APROVADO**

#### Segurança ao Deslizamento

- Força Resistente:  $F_r = (\sum V) \times \mu = 318 \times 78 \times 0,60 = 191,27 \text{ kN/m}$
- Força Atuante:  $H_a = E_a = 108,0 \text{ kN/m}$
- $F_{Sd} = F_r/H_a = 191,27/108,0 = 1,77$
- Critério:  $F_{Sd} \geq 1,5$
- Resultado:  $1,77 \geq 1,5 \Rightarrow$  **APROVADO**

#### VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES NA FUNDAÇÃO

##### Posição da Resultante e Excentricidade

- Posição da Resultante:  $\bar{x} = (\sum M_r - \sum M_t)/\sum V = (757,77 - 216,0)/318,78 = 1,70 \text{ m}$
- Excentricidade:  $e = B/2 - \bar{x} = 3,70/2 - 1,70 = 0,15 \text{ m}$
- Limite do Terço Médio:  $B/6 = 3,70/6 = 0,617 \text{ m}$
- Critério:  $e \leq B/6$
- Resultado:  $0,15 \leq 0,617 \Rightarrow$  **APROVADO**

##### Tensões na Base

- Tensão Máxima:  $\sigma_{\max}$   
 $= \sum V/B \times (1 + 6e/B) = (318,78/3,70) \times (1 + 6 \times 0,15/3,70) = 107,1 \text{ kPa}$
- Tensão Mínima:  $\sigma_{\min} = (\sum V/B) \times (1 - 6e/B) = (318,78/3,70) \times (1 - 6 \times 0,15/3,70) = 65,2 \text{ kPa}$

##### Verificação da Capacidade de Carga

- Critério 1:  $\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{adm}}$
- Resultado 1:  $107,1 \text{ kPa} \leq 200 \text{ kPa} \Rightarrow$  **APROVADO**
- Critério 2:  $\sigma_{\min} \geq 0$
- Resultado 2:  $65,2 \text{ kPa} \geq 0 \Rightarrow$  **APROVADO**

#### Resumo dos Resultados

Verificação	Critério	Valor Calculado	Status
Segurança ao Tombamento	$F_{St} \geq 2,0$	3,51	Aprovado
Segurança ao Deslizamento	$F_{Sd} \geq 1,5$	1,77	Aprovado
Posição da Resultante	$E \leq B/6$	$0,15 \text{ m} \leq 0,617 \text{ m}$	Aprovado
Tensão Máxima na Fundação	$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{adm}}$	$107,1 \text{ kPa} \leq 200 \text{ kPa}$	Aprovado

## Anexos E2 - Memorial de Cálculo da Estrutura de Reforçados com Geossintéticos.

### Parâmetros Geotécnicos do solos

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Solo de Aterro / Retido / Fundação
Peso Específico Úmido	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	18
Ângulo de Atrito Efetivo	$\phi'$	°	30
Coesão Efetiva	$c'$	kPa	5

### Cálculo da Resistência de Projeto (Td) dos Geossintéticos

Geossintético	Polímero Assumido	Tult (kN/m)	FRdi	FRf	FRdq	FR_total	Td (kN/m)
Geotêxtil Tecido	PP	50,0	1,20	4,0	1,1	5,28	<b>9,47</b>
Geogrelha	PET	50,0	1,10	1,6	1,1	1,94	<b>25,83</b>

### VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA

Os fatores de segurança mínimos exigidos pela NBR 11682 são 1,5 para deslizamento, 2,0 para tombamento e 3,0 para capacidade de carga da fundação.

- **Verificação ao Deslizamento:**
  - Força Solicitante:  $FS = Pa = 127,9$  kN/m
  - Força Resistente:  $FR = (H \times L \times \gamma) \times \tan(\phi') = (6,00 \times 5,55 \times 18) \times \tan(30^\circ) = 346,1$  kN/m
  - **FSdes = 341,1/127,9346,1 = 2,71  $\geq$  1,5 (APROVADO)**
  
- **Verificação ao Tombamento:**
  - Momento Solicitante:  $MS = Pa \times Ypa = 127,9 \times 2,16 = 276,3$  kN·m/m
  - Momento Resistente:  $MR = (H \times L \times \gamma) \times 2L = (599,4) \times 25,55 = 1663,3$  kN·m/m
  - **FStomb = 1663,3/276,31663,3 = 6,02  $\geq$  2,0 (APROVADO)**
  
- **Verificação da Capacidade de Carga da Fundação:**
  - Excentricidade (e):  $e = 2L - VMR - MS = 2,775 - 599,41663,3 - 276,3 = 0,46$  m (Dentro do terço médio)
  - Tensão Máxima na Base ( $\sigma_{max}$ ):  $\sigma_{max} = LV(1+L6e) = 5,55599,4(1+5,556 \times 0,46) = 161,7$  kPa
  - Capacidade de Carga Última (qult para  $\phi' = 30^\circ$ ): qult  $\approx$  803 kPa

- $FS_{funda} = 803/161,7803 = 4,97 \geq 3,0$  (APROVADO)

### Resumo da Verificação da Estabilidade Externa

Modo de Ruptura	FS Calculado	FS Mínimo (NBR 11682)	Status
Deslizamento na Base	2,71	1,5	<b>Aprovado</b>
Tombamento	6,02	2,0	<b>Aprovado</b>
Capacidade de Carga	4,97	3,0	<b>Aprovado</b>

### ANÁLISE DA ESTABILIDADE INTERNA (SOLO COM $\phi' = 30^\circ$ )

A análise interna verifica se os reforços resistem aos esforços de tração e arrancamento. Os cálculos foram realizados com o  $K_a=0,333$  e o ângulo da superfície de ruptura de  $60^\circ$ .

### Verificação da Estabilidade Interna – GEOTÊXTIL TECIDO ( $T_d = 9,47$ kN/m)

Camada Nº	Prof. z (m)	Tmax (kN/m)	Verif. Tração ( $T_{max} \leq T_d$ )	Le (m)	La (m)	Tr (kN/m)	FS arr ( $\geq 1,5$ )	Status Final
1	0,75	2,06	<b>Aprovado</b>	3,03	2,52	45,42	22,05	<b>Aprovado</b>
2	1,50	2,91	<b>Aprovado</b>	2,60	2,95	83,82	28,80	<b>Aprovado</b>
3	2,25	3,77	<b>Aprovado</b>	2,17	3,38	131,25	34,81	<b>Aprovado</b>
4	3,00	4,62	<b>Aprovado</b>	1,73	3,82	188,01	40,69	<b>Aprovado</b>
5	3,75	5,47	<b>Aprovado</b>	1,30	4,25	253,41	46,33	<b>Aprovado</b>
6	4,50	6,33	<b>Aprovado</b>	0,87	4,68	327,78	51,78	<b>Aprovado</b>
7	5,25	7,18	<b>Aprovado</b>	0,43	5,12	411,45	57,30	<b>Aprovado</b>
8	6,00	8,03	<b>Aprovado</b>	0,00	5,55	504,75	62,86	<b>Aprovado</b>

### Verificação da Estabilidade Interna – GEOGRELHA ( $T_d = 25,83$ kN/m)

Camada Nº	Prof. z (m)	Tmax (kN/m)	Verif. Tração ( $T_{max} \leq T_d$ )	Le (m)	La (m)	Tr (kN/m)	FS arr ( $\geq 1,5$ )	Status Final
1	0,75	2,06	<b>Aprovado</b>	3,03	2,52	94,37	45,81	<b>Aprovado</b>
2	1,50	2,91	<b>Aprovado</b>	2,60	2,95	174,04	59,81	<b>Aprovado</b>

Camada N°	Prof. z (m)	Tmax (kN/m)	Verif. Tração (Tmax ≤ Td)	Le (m)	La (m)	Tr (kN/m)	FS arr (≥ 1,5)	Status Final
3	2,25	3,77	<b>Aprovado</b>	2,17	3,38	272,28	72,22	<b>Aprovado</b>
4	3,00	4,62	<b>Aprovado</b>	1,73	3,82	389,12	84,22	<b>Aprovado</b>
5	3,75	5,47	<b>Aprovado</b>	1,30	4,25	524,40	95,87	<b>Aprovado</b>
6	4,50	6,33	<b>Aprovado</b>	0,87	4,68	678,82	107,24	<b>Aprovado</b>
7	5,25	7,18	<b>Aprovado</b>	0,43	5,12	849,60	118,33	<b>Aprovado</b>
8	6,00	8,03	<b>Aprovado</b>	0,00	5,55	1047,84	130,50	<b>Aprovado</b>