

Avaliação do Ciclo de Vida de Canais Hidráulicos com Impermeabilização de Geomembrana

Luiza Viana Pretti

Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, luizapretti@gmail.com

Narciso Sena Fracaroli

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, narcisosenafrcaroli@gmail.com

Mario René Rivera Osorto

Pesquisador, Universidade de Brasília, Brasília, marior.riverao@outlook.com

Giovanna Monique Alelvan

Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, giovannaalelvan@etg.ufmg.br

RESUMO: A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que avalia sistematicamente o impacto ambiental de um produto, processo ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração de recursos naturais até o descarte com o objetivo de identificar oportunidades de melhorias ambientais. Na engenharia geotécnica esta é uma importante ferramenta para realizar análises comparativas de soluções de projeto especialmente para considerar os impactos ambientais em diferentes categorias. Neste contexto, este trabalho visa analisar de forma comparativa o ciclo de vida de um projeto de um canal hidráulico impermeabilizado com geomembrana e outro com impermeabilização em concreto. O foco desta pesquisa foi na avaliação dos impactos ambientais nas principais categorias, como emissões de gases do efeito estufa, poluição do ar e da água, depleção da camada de ozônio, eutrofização, entre outros, utilizando a ferramenta OpenLCA. Os resultados indicam forte correlação dos impactos obtidos com as hipóteses adotadas durante a análise, o que permite ampliar a discussão da carência de dados primários adequados ao contexto brasileiro. Como conclusão, observou-se que esta é uma metodologia que pode ser amplamente utilizada na engenharia geotécnica, especialmente para priorização de soluções mais sustentáveis para a Geotecnia.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Ciclo de Vida, Geotecnia Ambiental, Impactos Ambientais, Geossintéticos.

ABSTRACT: Life Cycle Assessment (LCA) is a methodology that systematically evaluates the environmental impact of a product, process, or service throughout its entire life cycle, from raw material extraction to disposal, aiming to identify opportunities for environmental improvements. In geotechnical engineering, this is a significant tool for conducting comparative analyses of design solutions, especially to consider environmental impacts across different categories. In this context, this study aims to comparatively analyze the life cycle of a project involving a waterproofed hydraulic channel with a geomembrane and another with concrete waterproofing. The focus of this research was on evaluating environmental impacts in key categories such as greenhouse gas emissions, air and water pollution, ozone layer depletion, eutrophication, among others, using the OpenLCA tool. The results indicate a strong correlation between the impacts obtained and the assumptions made during the analysis, thereby opening up discussion on the lack of adequate primary data for the Brazilian context. In conclusion, it was observed that this is a methodology that can be widely used in geotechnical engineering, particularly for prioritizing more sustainable solutions in Geotechnics.

KEYWORDS: Life Cycle Assessment, Environmental Geotechnics, Environmental Impact, Geosynthetics.

1 INTRODUÇÃO

Conforme definido pela Conferência das Partes (COP21), com o objetivo central de fortalecer a resposta global à ameaça das mudanças climáticas e reforçar a capacidade dos países em lidar com os impactos resultantes dessas mudanças, um novo acordo foi adotado entre os países envolvidos (OZTURK, 2023). Portanto, é necessário que os governos desses países tomem iniciativas para atingir essas metas, buscando reduzir e evitar emissões que contribuam para o aumento da temperatura global.

Se tratando do âmbito da construção civil, o concreto é o material mais usado no mundo (THOMAS, 2022). A maior parte do concreto é composta de cimento. Todavia, a fabricação desse material é responsável por porcentagens significativas de emissão de CO₂ em uma escala global (OZTURK, 2023). Assim, dados os objetivos acordados na COP, uma das formas de reduzir o lançamento gases do efeito estufa na atmosfera relativos à produção de concreto é procurar novos materiais que sejam capazes de desempenhar a mesma função e que sejam menos agressivos ao meio ambiente.

Os geossintéticos são vistos como materiais com potencial para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa. Sua utilização teve origem na engenharia geotécnica, mas tem progredido através do surgimento de novas variações dos geossintéticos básicos originais. Com a sua função de barreira, têm sido bem-sucedidos na contenção de fluidos e podem ser utilizados como um revestimento único ou como parte de um revestimento composto (BIZJAK, 2018).

Assim, é importante avaliar alternativas de projetos que substituam a utilização de materiais poluentes como o concreto para materiais menos nocivos como os geossintéticos. Neste sentido, a Análise do Ciclo de Vida (ACV) é um método considerado eficiente nessa avaliação. Baseia-se numa análise sistemática dos impactos ambientais potenciais de qualquer produto, processo ou sistema ao longo do seu ciclo de vida (MORSY, 2022).

Portanto, o objetivo deste trabalho é comparar um projeto de impermeabilização de um canal de adução utilizando concreto com um projeto utilizando camadas de geossintéticos. A comparação foi realizada do ponto de vista ambiental, avaliando a eficiência da substituição da solução convencional, utilizando a metodologia de Análise de Ciclo de Vida e o software OpenLCA.

2 METODOLOGIA

2.1 Critérios ACV

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem como objetivo avaliar os impactos ambientais gerados ao longo de todo o ciclo de vida de um produto ou serviço. A metodologia surgiu devido a uma maior conscientização em relação à importância da proteção ambiental e impactos associados à fabricação e utilização de produtos. Ela é regulamentada pelas normas NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14044:2009 (ABNT, 2009).

A ACV é desenvolvida a partir de quatro principais etapas, que se encontram descritas abaixo, conforme NBR ISO 14040:2009 (ABNT, 2009): (i) definição de objetivo e escopo: definição dos objetivos da ACV, determinação das fronteiras utilizadas na avaliação e estabelecer quais impactos ambientais serão avaliados; (ii) análise de inventário: compilação e quantificação de entradas e saídas do sistema do produto ao longo do seu ciclo de vida; (iii) avaliação de impactos: compreensão e análise da magnitude e relevância dos impactos ambientais potenciais do sistema do produto ao longo de seu ciclo de vida; (iv) interpretação dos resultados: avaliação dos resultados da análise do inventário e da avaliação do impacto, que são utilizados como base para a tomada de decisões, definição de conclusões e recomendações relativas ao estudo realizado.

No presente estudo, foram utilizados os seguintes passos metodológicos: revisão bibliográfica, definição da seção típica de projeto, definição da unidade funcional do sistema, levantamento de quantitativos, seleção das bases de dados, condução da ACV no projeto com impermeabilização de concreto e no projeto com geomembrana, comparação entre os resultados obtidos em cada etapa.

A unidade funcional do sistema de produto é expressa como o volume de concreto e a área de geomembranas necessárias para que ambos impermeabilizem uma seção típica de um canal hidráulico. Os impactos ambientais gerados no processo e que serão analisados são: a emissão de gases do efeito estufa, a depleção da camada de ozônio, eutrofização e acidificação.

Para a análise foi utilizado o software *OpenLCA* - versão 2.1.0, onde realizou-se os cálculos a partir dos quantitativos obtidos para as duas soluções apresentadas. A avaliação se deu por meio de uma abordagem *cradle-to-practical-completion*, englobando desde a extração da matéria, passando pela fabricação dos materiais, instalação e transporte entre as etapas de produção. Para os cálculos, utilizou-se a metodologia TRACI 2.1, que utiliza fatores de caracterização que quantificam os impactos em unidades comuns de equivalência (*United State Environmental Protection Agency*). A Figura 1 apresenta o fluxograma com a fronteira do sistema de produto avaliado.

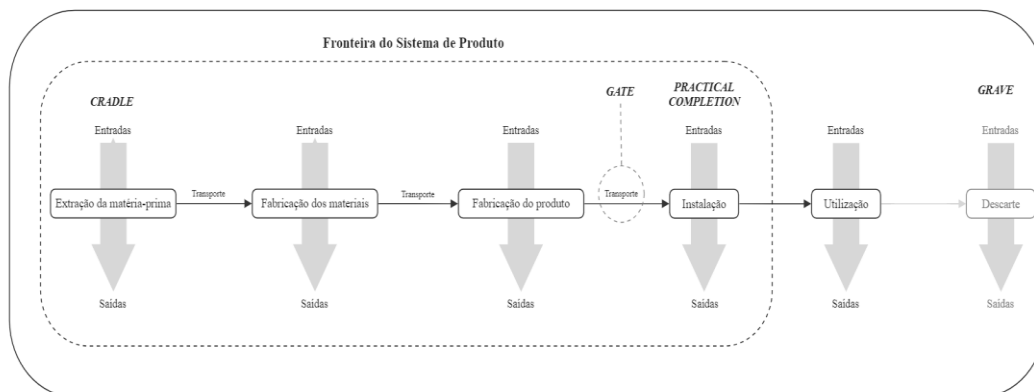


Figura 1. Fronteira do sistema de produto adotada (*cradle-to-practical-completion*)

A base de dados utilizada em quase toda a avaliação foi a desenvolvida pela *Federal Highway Administration*, uma agência pertencente ao Departamento de Transporte dos Estados Unidos. Já os dados referentes à produção dos geossintéticos foram retirados de EPD's (Declaração Ambiental de Produto) publicada pela *Naue*. Estas declarações contém, além dos resultados das avaliações de ciclo de vida realizadas, um detalhamento dos quantitativos considerados para cada produto. Este detalhamento servira como base para a caracterização dos geossintéticos a partir da base de dados da *FHA*.

2.2 Estudo de caso: canal hidráulico

Na fase de produção dos materiais, foram incluídos os impactos ambientais gerados pelo processamento da matéria-prima dos geossintéticos, transporte da matéria prima até a fábrica e a energia gasta no sistema. A seção típica adotada é apresentada na Figura 2, e o detalhe da ancoragem na Figura 3. Assim, considerando-se uma extensão de 5 m e uma ancoragem de 1,5 m em cada uma das extremidades, foi estimado um revestimento para o canal composto por 115 m² de cada geossintético considerado.

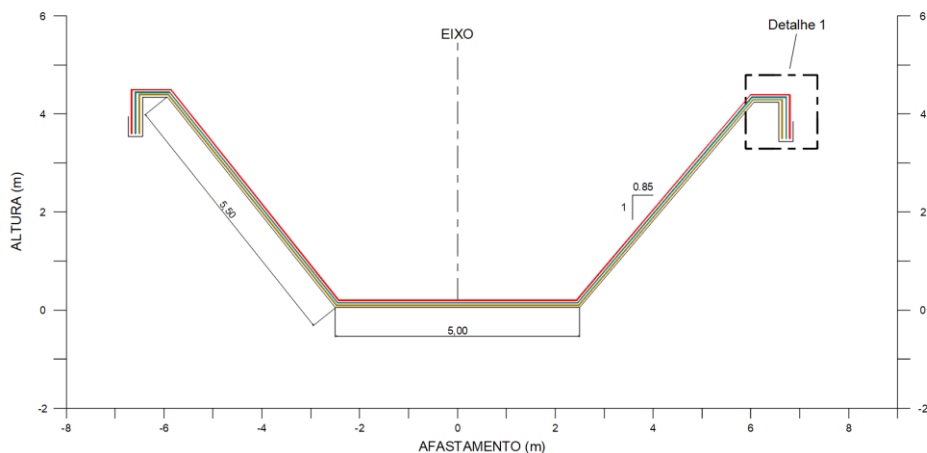


Figura 2. Seção típica do canal hidráulico.

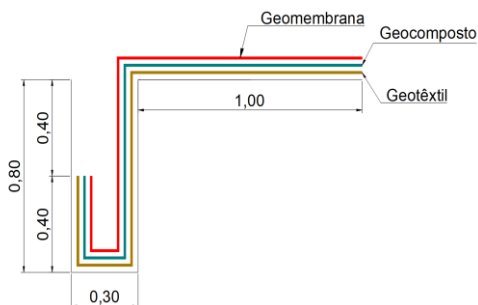


Figura 3. Detalhe na ancoragem da geomembrana.

No projeto em que se utiliza o concreto, consideraram-se apenas os materiais utilizados na sua produção, conforme disponível na base de dados. Porém, os agregados utilizados foram os encontrados dentro da base de dados, que representam de forma mais genérica os produtos em questão, não se atendo ao nível de detalhes utilizado no dimensionamento da estrutura. O traço calculado para o concreto por meio do método ACI e considerando os materiais apresentados na Tabela 1 foi de 1:1,51:2,67:0,45. Pela curva de Adams obtém-se uma relação água cimento de 0,45.

Tabela 1. Parâmetros utilizados no cálculo do traço do concreto

Fck do concreto	30 MPa
Abatimento do concreto	100 mm
Cimento CP II 32	3150 kg/m ³
Areia grossa	MF = 3,00 mm
	2650 kg/m ³
Brita 2	DMC = 32mm
	2750 kg/m ³
	MU _{comp} = 1650 kg/m ³

A Figura 4 indica a solução construtiva adotada para este cenário. Observa-se que além de se considerar uma seção de 20 m estendida em 5 m na longitudinal, tem-se uma espessura de 0,5 m de concreto sobre a face do canal, conforme informações de projeto. As quantidades de concreto necessárias foram estimadas a partir das Características do produto detalhadas anteriormente, embora a base de dados não permita entrar em um tal nível de detalhes quanto à sua natureza.

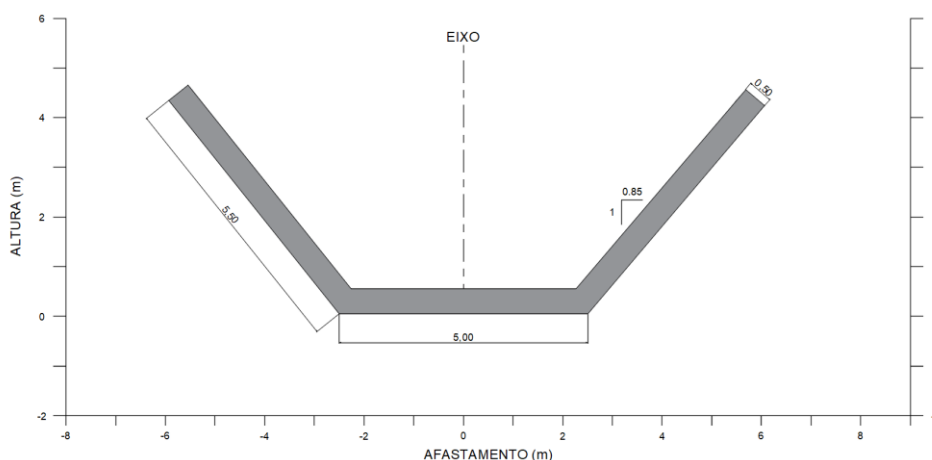


Figura 4. Seção típica – Impermeabilização com concreto.

A Tabela 2 apresenta os quantitativos dos materiais utilizados em cada solução, a partir da seção típica apresentada na Figura 2.

Tabela 2. Parâmetros utilizados no cálculo do traço do concreto

Material	Componente	Unidade	Quant.*
Concreto	Cimento	kg	433
	Brita 2	kg	1155
	Areia grossa	kg	656
	Água	L	195
Geomembrana	PEAD	g/m ²	1715
Geocomposto	PVC	g/m ²	873
	PEAD	g/m ²	15
Geotêxtil	Polipropileno	g/m ²	343

* as quantidades apresentadas são referentes à produção de 1m³ de concreto e 1m² de cada geossintético

Certas adaptações foram necessárias devido ao limite dos produtos disponíveis na base de dados selecionada. De acordo com as declarações ambientais dos geossintéticos, a geomembrana e o geocomposto são constituídos em partes por materiais reciclados. Todavia, neste estudo os geossintéticos foram considerados produzidos em sua totalidade por polímeros.

Além disso, considerando a obra num contexto brasileiro, onde a energia elétrica é gerada em sua grande maioria por usinas hidrelétricas (Tavares, 2023), toda a energia utilizada no processo foi considerada produzida por fontes hidráulicas. Todavia, devido à falta de bases de dados a energia necessária para produção e fabricação do concreto (fornos, misturadores, etc) não foi considerada na análise.

Na fase de instalação, para o caso do concreto, incluiu-se o aço aplicado na armação do revestimento do canal e as madeiras usadas como formas. Buscando maior sustentabilidade do projeto, foi considerado o reuso das formas de madeiras em cinco vezes (Bento, 2016). Por falta de informações, não foi considerado o vibrador utilizado no adensamento do concreto. Além disso, na etapa de instalação é realizada a armação do concreto, com isso, levou-se em consideração uma taxa de 100 kg por m³ de concreto. Para os geossintéticos considerou-se o combustível gasto pelos equipamentos de instalação, conforme fornecido pelas EPD's.

Na ACV da geomembrana, o transporte dos materiais engloba o deslocamento da matéria prima até a fabricação dos produtos, conforme especificado nas EPD's, e sua entrega até o consumidor final (ponto de instalação). No caso do concreto, o transporte considerado inclui apenas a fase de entrega do produto até a obra, devido à falta de dados com relação ao transporte das matérias-primas. A distância de transporte utilizada na análise foi de 15 quilômetros, sendo realizada em ambos os casos por caminhões movidos a diesel.

3 RESULTADOS

A partir da metodologia apresentada, os cálculos foram realizados por meio do software OpenLCA, conforme descrito na metodologia. Foram investigadas quatro categorias de impacto, sendo elas: aquecimento global (AQG), acidificação (ACD), depleção da camada de ozônio (DCO) e eutrofização (EUT). A Figura 5 sintetiza os resultados adquiridos por meio desta análise, a partir da comparação relativa, para cada indicador, dos resultados obtidos para o cenário de concreto armado.

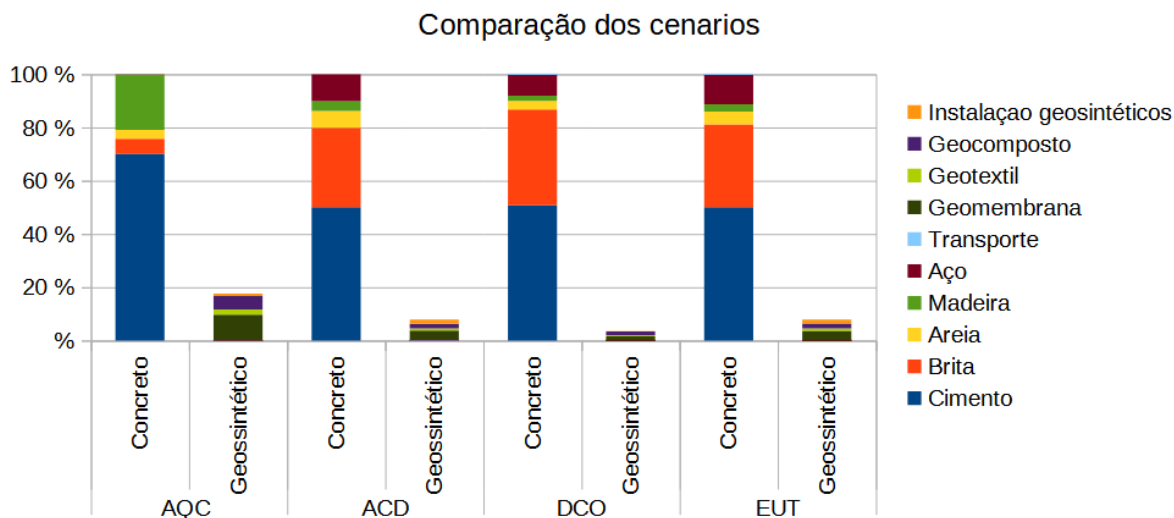


Figura 5. Comparação entre as soluções de impermeabilização para os indicadores selecionados.

Nota-se que a solução em que se emprega os geossintéticos apresentou um impacto equivalente a uma fração de 7 a 18% do seu equivalente em concreto. A diferença relativa foi especialmente importante sob o critério da depleção da camada de ozônio, onde os impactos foram 93% inferiores. Por outro lado, a menor diferença relativa entre os dois cenários ocorreu no critério de aquecimento global, sendo ela ainda importante, de 82%. Os impactos ambientais calculados para a solução de revestimento com concreto armado são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Impactos ambientais gerados pelo uso do concreto

	AQG	ACD	DCO	EUT
	Kg CO2 eq	kg SO2 eq	kg CFC-11 eq	kg N eq
TOTAL	4852	18,04	0,11 10-3	0,91
Fabricação do concreto	3834	14,36	8,92E-5	0,70
Cimento	3402	10,74	7,82E-5	0,57
Brita	271	2,31	6,93E-6	0,09
Areia	160	1,31	4,13E-6	0,05
Lançamento e adensamento do concreto	1014	3,65	1,76E-5	0,21
Madeira	1010	3,64	1,76E-5	0,21
Aço	4	0,01	3,92E-9	0,0001
Transporte	4	0,02	2,44E-8	0,0012
Caminhão truck a diesel	4	0,02	2,44E-8	0,0012

O principal produto responsável pelos impactos ambientais do concreto foi o cimento utilizado, com uma contribuição indo de 60% com a acidificação a 70% com os indicadores de eutrofização e de mudança climática. Estes impactos vêm principalmente da produção do cimento, procedimento frequentemente indicado devido ao seu elevado impacto ambiental.

Ele foi seguido pelas madeiras utilizadas nas fôrmas, cujas contribuições aos impactos variaram de 16 a 23%. A principal fonte deste impacto, segundo a análise da base de dados, é a matéria-prima (madeira) utilizada na produção das tábuas, estando atrelado principalmente à energia gasta na extração e processamento

deste material. Esta observação reforça o interesse não somente econômico, mas também ambiental de otimizar-se o uso de fôrmas na construção, bem como de buscar alternativas à solução tradicional em madeira, em especial no contexto brasileiro, no qual as mudanças de uso da terra apresentam uma contribuição importante nas emissões do país. Finalmente, observa-se uma contribuição reduzida de elementos tais que o aço e o transporte.

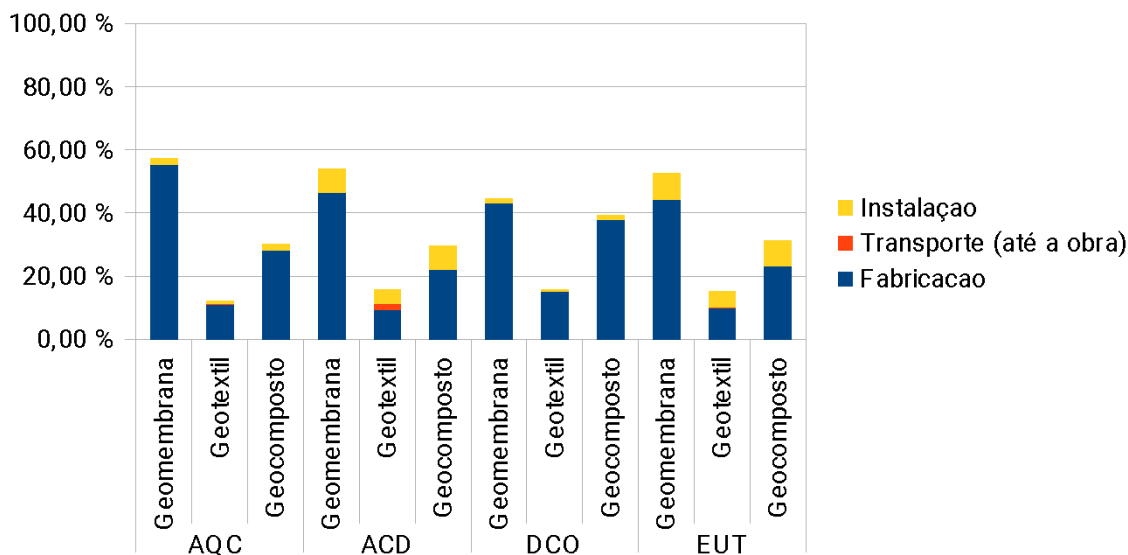


Figura 6. Contribuição de cada um dos geossintéticos no impacto total do cenário.

Nota-se que a geomembrana concentrou, em todos os indicadores, mais de 50% do impacto total da alternativa, principalmente devido à sua fabricação. Este fenômeno se justifica em parte devido aos elementos da tabela 2, conectados à unidade funcional escolhida, e em parte devido aos materiais empregados e à base de dados utilizada. Esta tabela mostra que a geomembrana apresenta maior quantidade de matérias-primas consideradas, com 1715 g/m² de materiais considerados, contra menos de 900 g/m² para os demais geossintéticos. Esta diferença produziria, para um mesmo material em todos os produtos, um resultado naturalmente maior para a geomembrana. Adiciona-se a esta questão a diferença de impacto ambiental de cada um dos materiais adotados, responsável em outra parte pelas diferenças observadas.

Os resultados mostram que a solução em que se utiliza a geomembrana atrelada aos outros geossintéticos como material impermeabilizante são gerados menos impactos ambientais se comparada à solução em que o concreto é utilizado.

Nota-se que a maior parte dos impactos gerados pelos geossintéticos são devidos aos materiais poliméricos utilizados em sua composição. Com relação ao concreto, a maior parte dos impactos gerados é devido a presença do cimento em sua composição. Além disso, as fôrmas de madeira produzem impactos significantes se comparado com o todo, ainda que seja reutilizada por 5 vezes.

Observa-se ainda que com a aplicação de materiais geossintéticos no projeto do canal, os impactos totais produzidos são menores que os gerados pelo concreto. Apesar da representatividade limitada da base de dados adotada quanto ao contexto brasileiro, o caráter genérico de muitos dos dados empregados permitiram de estabelecer-se uma ordem de grandeza suficiente para retratar-se o interesse na aplicação das soluções baseadas em geossintéticos nas obras geotécnicas nacionais.

5 CONCLUSÕES

Esta análise comparativa de ciclo de vida entre duas soluções de impermeabilização de canais hidráulicos, usando geossintéticos e concreto, revela que adotar a solução com geomembranas pode reduzir os impactos ambientais. Embora a produção de polímeros para geossintéticos seja uma fonte significativa de impacto negativo, a produção de cimento supera em termos de impactos ambientais.

No entanto, para uma avaliação mais precisa e representativa, é essencial contar com uma base de dados mais robusta, específica para o contexto brasileiro e incluindo materiais comuns em obras nacionais, além de equipamentos. Mesmo com o uso de três tipos de geossintéticos no projeto da geomembrana, os impactos permanecem menores do que os gerados pelo canal de concreto.

Destaca-se ainda a lacuna no investimento em pesquisas sobre os impactos da produção de materiais no Brasil. Preencher essa lacuna permitiria o desenvolvimento de estruturas menos prejudiciais ao meio ambiente por parte de empresas de engenharia e projetistas, alinhando-se às metas estabelecidas nas Conferências das Partes para combater as mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Universidade Federal de Minas Gerais, a CAPES e ao CNPq pelo apoio e fomento a pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 14040. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 14044. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de Vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro.
- Bento, R. (2016). 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, Instituto de Arquitetura e Urbanismo / USP, 217 p.
- Bizjak, K. F., Lenar, S. (2018) *Life cycle assessment of a geosynthetic-reinforced soil bridge system – A case study. Geotextiles and Geomembranes*. 46, p. 543-558
- Morsy, K. M., Thakeb, H. (2022) *Comparative evaluation of the environmental impacts of geosynthetic Mechanically Stabilized Earth walls. Journal of Cleaner Production*, 374, p. 133912.
- Ozturk, I., Razzaq, A., Sharif, A., Yu, Z. (2023) *Investigating the impact of environmental governance, green innovation, and renewable energy on trade-adjusted material footprint in G20 countries. Resources Policy*, 86, p. 104212.
- Tavares, L. A. (2023). Matriz Elétrica Brasileira e as Tendências Futuras. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218, 4(5), p. 453135.
- Thomas, B. S., Yang, J., Bahurudeen, A., Chinnu, S.N., Abdalla, J.A., Hawileh, R.A., Hamada, H.M. (2022) *Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review. Cleaner Materials*, 3, p. 100056.
- United States Environmental Protection Agency (2012). *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI) TRACI version 2.1. User's Guide*. Cincinnati