XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/71

Avaliação do Ciclo de Vida da Fibra de Coco como Reforço de Solo: Análise Ambiental e Geotécnica

Mayara Luana Santana Santos
MSc. em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília DF, Brasil, mayaraluana.ml@gmail.com

Mario Rene Rivera Osorto
MSc. em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília DF, Brasil, marior.riverao@outlook.com

Michéle Dal Toé Casagrande
Professora Titular, Universidade de Brasília, Brasília DF, Brasil, mdtcasagrande@unb.br

RESUMO: A crescente demanda por soluções geotécnicas mais sustentáveis tem impulsionado a busca por alternativas aos métodos convencionais de melhoria de solos, como o uso de cimento, associados a elevado consumo energético e emissões significativas de gases de efeito estufa. Nesse contexto, as fibras naturais, em especial a fibra de coco, destacam-se como potencial material de reforço, já reconhecido por sua eficiência mecânica em solos. O presente estudo tem como objetivo avaliar, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), 1 m³ de solo reforçado com fibras de coco, 0,25% e 0,50% em relação ao peso seco do solo na estabilização de taludes, comparando-o ao solo puro e à solução convencional com 3% de cimento. A modelagem foi realizada no software OpenLCA, utilizando dados primários experimentais e dados secundários da base Ecoinvent 3.9.1, com aplicação do método ReCiPe 2016. Os resultados indicaram que a adição de fibras promove aumento moderado nos impactos ambientais em relação ao solo natural, até 21,3% no potencial de aquecimento global, porém significativamente inferior à solução com cimento, que apresentou incremento de aproximadamente 294,6%. Conclui-se que, quando atendidos os requisitos geotécnicos, o uso de fibras de coco configura alternativa ambientalmente favorável para melhoria de taludes.

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Fibras de coco, Reforço de solo, Geotecnia sustentável, Impactos ambientais.

ABSTRACT: The growing demand for more sustainable geotechnical solutions has driven the search for alternatives to conventional soil improvement methods, such as the use of cement, which are associated with high energy consumption and significant greenhouse gas emissions. In this context, natural fibers, particularly coconut fibers, stand out as a potential reinforcement material, already recognized for their mechanical efficiency in soils. This study aims to evaluate, through Life Cycle Assessment (LCA), 1 m³ of soil reinforced with coconut fibers, 0.25% and 0.50% by dry soil weight for slope stabilization, comparing it with natural soil and a conventional solution using 3% cement. The modeling was conducted using OpenLCA software, based on primary experimental data and secondary data from the Ecoinvent 3.9.1 database, applying the ReCiPe 2016 impact assessment method. The results indicated that the incorporation of fibers leads to a moderate increase in environmental impacts compared to natural soil, up to 21.3% in Global Warming Potential, yet significantly lower than the cement-based solution, which showed an increase of approximately 294.6%. It is concluded that, when geotechnical requirements are satisfied, the use of coconut fibers represents an environmentally favorable alternative for slope improvement.

KEYWORDS: Life Cycle Assessment (LCA), Coconut fibers, Soil reinforcement, Sustainable geotechnics, Environmental impacts.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, observa-se um crescimento significativo da demanda por soluções geotécnicas mais sustentáveis, impulsionado tanto por restrições econômicas quanto pela necessidade de reduzir os impactos ambientais associados às obras de infraestrutura. Tradicionalmente, técnicas de estabilização e reforço de solos baseiam-se no emprego de materiais convencionais, como cimento, cal e geossintéticos, os quais, embora

eficientes do ponto de vista técnico, frequentemente apresentam elevado custo energético de produção, consumo intensivo de recursos naturais e significativa emissão de gases de efeito estufa (Mohammed *et al.*, 2023). Nesse cenário, torna-se cada vez mais relevante a busca por materiais alternativos que conciliem desempenho geotécnico adequado com menor impacto ambiental.

Dentre as alternativas investigadas, destaca-se o uso de fibras naturais como elementos de reforço de solos, abordagem que tem sido amplamente estudada em diferentes contextos geotécnicos (Santos, 2026). Conforme Imran *et al.*, (2024), entre os diversos tipos de fibras vegetais, a fibra de coco tem se destacado em estudos recentes em virtude de sua elevada resistência à tração, relativa durabilidade em meios naturais e significativa disponibilidade como subproduto agroindustrial. Investigações experimentais conduzidas por diferentes autores têm demonstrado que a incorporação de fibras de coco em solos pode resultar em ganhos expressivos de resistência à compressão simples e ao cisalhamento, bem como em melhorias no comportamento pós-pico, indicando a viabilidade técnica do material como elemento de reforço em aplicações como estabilização de taludes e reforço de solos moles (Santos & Casagrande, 2023).

Apesar desses avanços, observa-se que a maior parte das pesquisas se concentra predominantemente na avaliação do desempenho mecânico, permanecendo ainda limitada a compreensão acerca dos impactos ambientais associados à utilização dessas fibras em aplicações geotécnicas. Em outras palavras, embora a eficiência técnica já tenha sido amplamente demonstrada, ainda existe uma lacuna relevante quanto à real vantagem ambiental do uso de fibras naturais quando analisado sob uma perspectiva sistêmica, que considere todas as etapas envolvidas, desde a obtenção da matéria-prima até a fase de aplicação.

Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) apresenta-se como uma ferramenta metodológica particularmente adequada, uma vez que permite quantificar, de forma sistemática e padronizada, os impactos ambientais associados a produtos, processos ou sistemas ao longo de todo o seu ciclo de vida (Dervishaj & Gudmundsson, 2024).Trata-se de uma metodologia amplamente consolidada no meio científico e definida pelas normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e 14044:2009 da Organização Internacional de Normalização, adequadas para o mercado brasileiro, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), sendo cada vez mais empregada como instrumento de apoio à tomada de decisão em projetos de engenharia e infraestrutura.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo realizar a Avaliação do Ciclo de Vida do uso de fibras de coco como material de reforço de solo em um talude em comparação com uma solução de reforço de solo convencional, integrando a análise ambiental à avaliação geotécnica, de modo a contribuir para o avanço do conhecimento acerca da viabilidade técnica e ambiental dessa solução e fornecer subsídios para a adoção de práticas mais sustentáveis na engenharia geotécnica.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Solos Reforçados com Fibras Naturais

O emprego de técnicas de reforço é frequentemente adotado quando o solo disponível no local da obra não apresenta, em seu estado natural, as propriedades geotécnicas requeridas em projeto, tornando necessária a melhoria de determinadas características de resistência e deformabilidade. A incorporação de fibras aos solos, formando um material compósito, é uma prática conhecida, entretanto o aprofundamento científico sobre esse tema intensificou-se principalmente nas últimas décadas. Atualmente, a técnica tem sido aplicada em diferentes contextos da engenharia geotécnica, incluindo o reforço de solos moles, a estabilização de taludes, a execução de aterros e o aumento da estabilidade em estruturas de contenção, evidenciando sua versatilidade e potencial de aplicação.

No contexto brasileiro, a fibra de coco tem sido objeto de diversas investigações voltadas à avaliação de sua aplicabilidade como material de reforço de solos. Santos & Casagrande (2023), por exemplo, analisou o comportamento mecânico e a durabilidade de compósitos constituídos por solo argiloso reforçado com fibras de coco, com o objetivo de verificar o potencial de utilização desse material em obras geotécnicas. Os resultados obtidos indicaram que, mesmo após seis meses de envelhecimento natural, as fibras mantiveram sua contribuição para o reforço do solo, apresentando baixos níveis de degradação e desempenho satisfatório do ponto de vista mecânico.

2.1.1 Fibras naturais de coco

As fibras de coco verde são originárias do fruto do coqueiro, cultura amplamente difundida em regiões tropicais e subtropicais. Segundo a FAO (2023) o Brasil permanece entre os principais produtores mundiais: estimativas recentes indicam uma produção em torno de 1,8 a 2,1 milhões de toneladas de coco em 2022 e 2023, mantendo-se como um dos maiores produtores globais, com forte concentração da atividade na região Nordeste. A demanda crescente por água de coco e derivados tem impulsionado a expansão do cultivo, especialmente nos estados nordestinos, que respondem por mais de 70% da produção nacional em anos recentes, com destaque para Ceará, Bahia, Pernambuco e Sergipe.

Após o consumo da água de coco, a casca é considerada um subproduto e corresponde a aproximadamente 80 a 85% da massa do fruto, constituindo-se em uma biomassa lignocelulósica volumosa e de difícil disposição adequada. Estudos apontam que apenas uma fração ainda limitada desse resíduo é efetivamente reaproveitada em cadeias industriais (produção de fibras, substratos, energia e biocombustíveis), de modo que grande parte das cascas continua sendo descartada sem beneficiamento, apesar de seu reconhecido potencial energético e de uso em materiais (Cabral *et al.*, 2016).

As fibras extraídas das cascas de coco, portanto, são frequentemente tratadas como rejeito, mas apresentam elevado potencial tecnológico ainda pouco explorado em aplicações de engenharia, inclusive como reforço em matrizes cimentícias e em solos. Diversos trabalhos recentes, como de Santos & Casagrande (2023), indicam que as fibras de coco exibem boa resistência à tração, elevada tenacidade e desempenho mecânico satisfatório quando incorporadas a concretos e solos, com propriedades que dependem do comprimento, diâmetro e integridade superficial das fibras. Embora biodegradáveis, o alto teor de lignina confere a essas fibras uma durabilidade relativamente superior à de muitas outras fibras vegetais em meios naturais e cimentícios, o que reforça seu interesse como reforço de baixo custo, renovável e associado ao aproveitamento de um subproduto agroindustrial abundante.

2.2 Avaliação de Ciclo de Vida em Solos Reforçados com Fibras Naturais

No contexto de solos reforçados com fibras, a ACV permite comparar soluções convencionais, como estabilização com cal ou solo-cimento, com alternativas que empregam fibras naturais, considerando todas as etapas, desde a extração de matérias-primas até a disposição final. Estudos de ACV, como Merta *et al.,* (2018) aplicados a compósitos cimentícios e de concreto reforçados com fibras naturais mostra a redução de impactos como potencial de aquecimento global, demanda de energia fóssil e esgotamento de recursos quando há substituição parcial de reforços sintéticos por fibras de origem vegetal, ainda que existam *trade-offs* em categorias como eutrofização e ecotoxicidade associadas ao cultivo agrícola.

Embora a literatura de ACV focada especificamente em solos reforçados com fibras naturais ainda seja incipiente, resultados obtidos para compósitos cimentícios e estruturas reforçadas com fibras vegetais indicam tendências relevantes para a geotecnia. No estudo de Lopez-Arraiza *et al.,* (2025) foram realizadas avaliações de ciclo de vida com fibras naturais, como linho, mostram pegada ambiental inferior à de soluções convencionais, especialmente quando consideradas abordagens “berço ao-aoportão-portão” e cenários de aproveitamento de resíduos agroindustriais como fonte de fibra.

Transpondo essas evidências para o caso de solos reforçados, a utilização de fibras naturais oriundas de resíduos agroindustriais, como o coco, tende a apresentar vantagens ambientais relevantes frente a reforços convencionais, sobretudo quando a fibra é considerada resíduo de baixo valor. Ainda assim, lacunas importantes permanecem, como a necessidade de modelos que integrem, de forma acoplada, desempenho mecânico, durabilidade e impactos de ciclo de vida, bem como a padronização de inventários específicos para fibras naturais aplicadas em geotecnia.

3 METODOLOGIA

3.1 Definição do escopo

A ACV realizada neste estudo tem como objetivo quantificar os impactos ambientais associados ao uso de fibras de coco como material de reforço de solo aplicado à estabilização de taludes, considerando as

principais etapas envolvidas desde a obtenção da matéria-prima até sua aplicação na obra geotécnica. Comparando com outro tipo convencional de melhoramento de solo.

O limite sistema analisado compreende as etapas de produção da matéria prima e beneficiamento das fibras de coco, preparo da mistura solo-fibra e execução do reforço no talude (Figura 1). Dessa forma, a análise contempla os processos diretamente relacionados à produção e utilização do material de reforço, permitindo avaliar os impactos ambientais associados à sua implementação em condições representativas de campo. Não contempla as etapas de operação e manutenção dos taludes. Para o presente estudo, o limite espacial considerou-se o local do talude na região nordeste, estabelecendo distâncias padrão para transporte dos materiais e instalação. Contudo, o foco do estudo foi definido da forma que o local de instalação não afete o resultado, só considerando como parâmetro geral que o talude é no Brasil.



Figura 1. Limite do Sistema.

Como unidade funcional, adotou-se um volume unitário (m³) compactado a 100% de proctor normal de: solo puro, para fins de comparação, solo reforçado com 0,25% de fibras de coco, solo reforçado com 0,50% de fibras de coco e solo estabilizado com 3,0% de cimento, para ter uma comparação com outro método convencional de melhoramento de solos.

A etapa de modelagem do inventário do ciclo de vida, foram utilizados dados primários obtidos a partir dos estudos com fibras de coco em solo reforçado de Aguilar (2015), os quais foram complementados por dados secundários provenientes da base de dados de inventário de ciclo de vida Ecoinvent, versão 3.9.1, amplamente empregada em estudos ambientais devido à sua abrangência e confiabilidade. Já para a solução convencional de solo-cimento são extraídos os dados do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do Departamento de Infraestrutura de Transportes (DNIT) em termos de consumo de materiais, rendimentos de equipamentos e consumo energético. O gerenciamento e a modelagem dos dados primários e secundários foram realizados com o auxílio do software OpenLCA, que possibilita a estruturação dos fluxos de materiais e energia, bem como a organização sistemática dos processos que compõem o sistema analisado. Na Tabela 1 é apresentado os inventários de processos considerados para cada uma das soluções de misturas com solo adotadas das unidades funcionais de 1 m³.

Tabela 1. Inventário dos processos

Produto	Quantidade				Unidade
	Solo Puro	**Solo + 0,25% Fibra de coco**	**Solo + 0,50% Fibra de coco**	**Solo + 3% de cimento**	
Trator agrícola sobre pneus - 77 kW	0,0031	0,0031	0,0031	-	h
Motoniveladora – 93 kW	0,0059	0,0059	0,0059	-	h
Caminhão tanque com capacidade de 10000 L – 188 kW	0,0054	0,0054	0,0054	0,00895	h
Distribuidor de agregados sobre pneus autopropelido – 130 kW	-	-	-	0,0087	h
Rolo compactador de pneus autopropelido de 27t – 85 kW	-	-	-	0,00298	h
Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t – 82 kW	0,0017	0,0017	0,0017	0,0074	h
Carregadeira de pneus com capacidade de 3,40 m³ - 195 kW	-	-	-	0,0083	h
Grupo gerador – 113 kVA	-	-	-	0,0083	h
Usina misturadora de solos com capacidade de 300 t/h – 44 kW	-	-	-	0,0083	h
Areia	1614,33	1568,42	1553,49	2560,80	kg
Fibras de coco	-	3,92	7,77		kg
Água	161,43	156,84	155,35	256,08	kg
Cimento Portand CP II	-	-	-	61,89	kg

Para a etapa de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), foi adotada a metodologia ReCiPe 2016 níveis *midpoint*, originalmente desenvolvida em 2008 e posteriormente atualizada, a qual apresenta representatividade global. Essa metodologia permite a classificação e a caracterização das emissões e da extração de recursos naturais em diferentes categorias de impacto, por meio da aplicação de fatores de caracterização, possibilitando a quantificação dos potenciais impactos ambientais associados ao sistema analisado.

As categorias de impacto utilizadas no presente estudo são: Potencial de Aquecimento Global (kg CO_2-eq), Escassez dos recursos energéticos (kg oil-eq), Escassez dos recursos minerais (kg Cu-eq), Formação de material particulado (kg PM2.5-eq) e Consumo de água (m³). A seleção dessas categorias específicas justifica-se por sua maior relevância para o contexto da engenharia geotécnica, especialmente em obras de infraestrutura, nas quais se destacam as emissões de gases de efeito estufa, o consumo de energia e recursos naturais, a geração de poluentes atmosféricos associados a equipamentos e processos construtivos e a demanda hídrica. Dessa forma, optou-se por priorizar indicadores relacionados ao uso intensivo de materiais, energia e processos mecânicos, característicos de intervenções em solo, garantindo maior objetividade na interpretação dos resultados.

4 RESULTADOS

A partir da Metodologia ACV, são apresentados os resultados para 1 m³ de solo puro (ao natural), de solo reforçado com 0,25% de fibra de coco, 0,50% de fibras de coco e solo estabilizado com 3,0% de cimento. Os resultados são representados na Figura 1 para cada uma das categorias de impacto previamente selecionadas. As categorias de formação de material particulado, expressado em kg de partículas suspendidas no ar de 2.5 micras (PM2.5) equivalentes; esgotamento de recursos fósseis, expressado em kg de petróleo equivalentes; potencial de aquecimento global e mudanças climáticas, expressado em kg de dióxido de carbono equivalentes; esgotamento de recursos minerais, expressado em kg de cobre equivalentes e consumo de água em termos de volume de água utilizada para o processo, em m³.

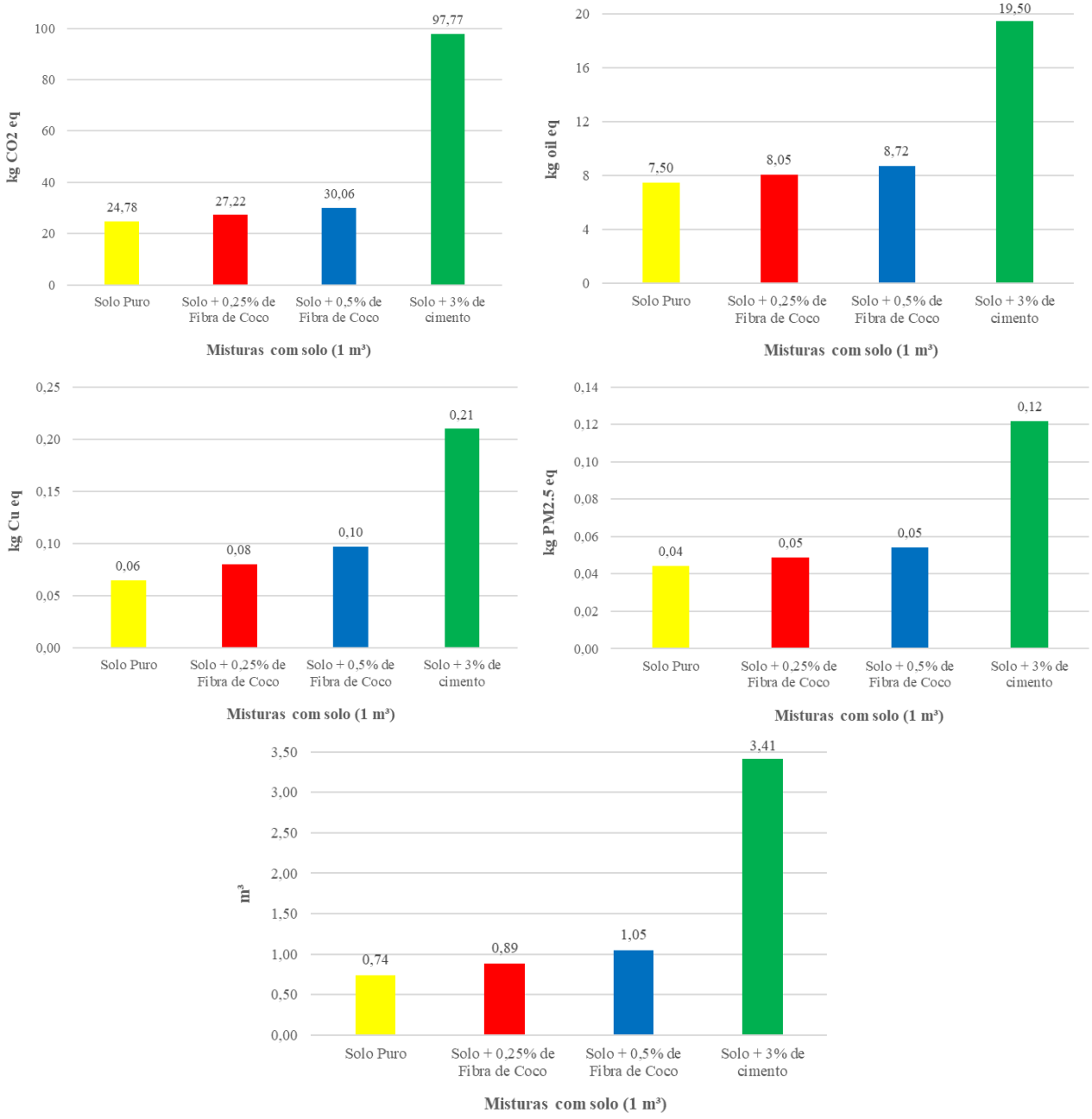


Figura 2. Resultados da AICV: (a) Potencial de Aquecimento Global; (b) Escassez dos recursos energéticos; (c) Escassez dos recursos minerais; (d) Formação de material particulado; (e) Consumo de água.

O cenário de solo puro na análise é fundamental para estabelecer uma linha de base ambiental do sistema estudado. De fato, esse cenário apresentou os menores valores em todas as categorias de impacto avaliadas. Entretanto, sob a perspectiva geotécnica, especialmente em obras como taludes de grande porte, o solo natural, em sua condição original, frequentemente não atende aos requisitos mínimos de estabilidade e segurança estabelecidos em projeto. Assim, embora ambientalmente mais favorável em termos absolutos, sua aplicação isolada pode não ser tecnicamente viável. Nesse contexto, a adoção de técnicas de melhoria ou reforço torna-se necessária, e a análise integrada entre desempenho mecânico e impacto ambiental passa a ser determinante para a escolha da solução mais adequada.

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que o potencial de aquecimento global aumenta de 24,78 kg CO_2 eq, no solo puro, para 27,22 kg CO_2 eq com a incorporação de 0,25% de fibras de coco, o que representa um acréscimo aproximado de 9,9%. Para o teor de 0,50% de fibras, o valor alcança 30,06 kg CO_2 eq,

correspondendo a um aumento de cerca de 21,3% em relação ao solo natural. Embora haja crescimento progressivo dos impactos com o aumento do teor de fibras, tal variação mostra-se relativamente moderada quando comparada à estabilização convencional com 3% de cimento, cujo impacto atinge 97,77 kg CO_2 eq, representando um incremento de aproximadamente 294,6% em relação ao solo puro. Esses resultados evidenciam que, ainda que a solução cimentícia seja amplamente reconhecida por sua eficiência geotécnica, seu custo ambiental é substancialmente mais elevado. O expressivo aumento nas emissões associadas ao cimento está relacionado, sobretudo, ao processo de produção do clínquer, intensivo em energia e emissões de CO_2. Assim, sob a ótica ambiental, a estabilização com cimento revela-se significativamente mais agressiva quando comparada às alternativas com fibras naturais.

Na categoria de recursos energéticos, os valores seguem tendência semelhante. O solo puro apresentou 7,50, aumentando para 8,05 e 8,72 com 0,25% e 0,50% de fibras, respectivamente. Já a mistura com cimento atingiu 19,50. Esse resultado reforça que, embora a introdução das fibras gere incremento ambiental em relação ao solo natural, tal aumento é marginal quando comparado ao impacto associado à produção do cimento. Nas categorias relacionadas à ecotoxicidade e formação de material particulado fino, observa-se comportamento consistente: o aumento do teor de fibra implica leve elevação nos impactos, enquanto o uso de cimento resulta em valores substancialmente superiores. Por exemplo, na formação de material particulado, o solo puro apresentou 0,04 kg PM2.5-Eq, enquanto a mistura com 3% de cimento atingiu 0,12 kg PM2.5-Eq, aproximadamente três vezes superior. Esse resultado é coerente com os processos industriais associados à produção do clínquer. No indicador relacionado ao consumo de recursos (m^3), nota-se aumento progressivo com a adição de fibras de 0,74 para 1,05 m^3, porém novamente com diferença marcante em relação ao cimento.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos a partir de uma normalização interna dos impactos ambientais avaliados, na qual o maior valor de cada categoria foi considerado como referência (100%), sendo os demais resultados expressos de forma relativa a esse valor. Nesse caso, o cenário de solo melhorado com 3% de cimento apresentou os maiores impactos em todas as categorias analisadas. A partir dessa normalização, torna-se possível comparar visualmente o desempenho ambiental dos diferentes cenários avaliados, evidenciando que as soluções com reforço de fibras de coco apresentam impactos significativamente inferiores aos observados na estabilização com cimento. Observa-se ainda que o aumento do teor de fibras de 0,25% para 0,50% promove apenas incrementos moderados nos impactos, mantendo-se, entretanto, substancialmente abaixo do cenário cimentado em todas as categorias consideradas.

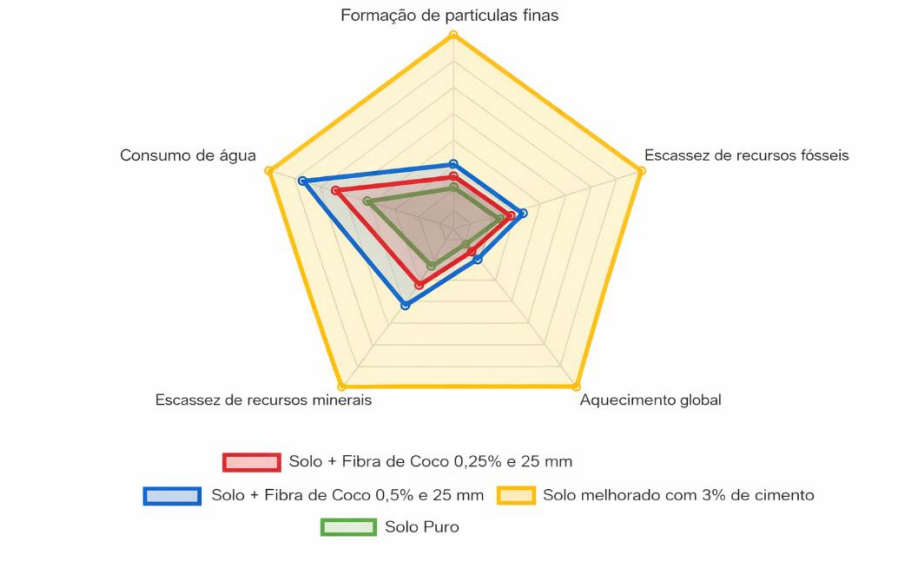


Figura 3. Normalização interna dos impactos ambientais.

5 CONCLUSÃO

Os resultados indicam que a incorporação de fibras de coco provoca aumento moderado nos impactos ambientais quando comparada ao solo puro, o que era esperado, uma vez que há introdução de um novo

material no sistema. Entretanto, quando a análise é realizada em perspectiva comparativa com a estabilização tradicional com cimento, observa-se redução significativa em todas as categorias avaliadas.

Isso sugere que o uso de fibras naturais pode representar uma alternativa ambientalmente mais favorável para aplicações geotécnicas específicas, especialmente quando a solução convencional envolver adições cimentícias. Contudo, é fundamental destacar que a viabilidade ambiental não deve ser analisada isoladamente. A escolha da solução deve considerar simultaneamente o desempenho geotécnico. Caso os ganhos no fator de segurança proporcionados pelas fibras sejam suficientes para atender aos requisitos de estabilidade, a solução passa a apresentar não apenas viabilidade técnica, mas também vantagem ambiental relativa. Dessa forma, os resultados reforçam a importância de análises integradas entre desempenho mecânico e avaliação ambiental, evitando decisões baseadas exclusivamente em critérios estruturais ou exclusivamente ambientais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, da Universidade de Brasília (PPGG/UnB), ao Laboratório de Novos Materiais Geotécnicos NGM/UnB, ao CNPq, na colaboração, suporte e financiamento do projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 14040 – Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 21 p., 2009.

ABNT NBR ISO 14044 – Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 46 p., (versão corrigida 2014), 2009.

Cabral, M. M. S., Abud, A. K. S., Silva, C. E. F., & Almeida, R. M. R. G. (2016). Bioethanol production from coconut husk fiber. Ciência Rural, 46(10), 1872–1877. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20151331

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

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). FAOSTAT statistical database: Crops and livestock products – Coconut production (2022–2023). FAO. https://www.fao.org/faostat.

Imran, A. I., Siregar, J. P., Cionita, T., Hadi, A. E., Setiyo, M., Mat Rejab, M. R., Jaafar, J., Fitriyana, D. F., & Dewi, R. (2024). Advancements in sustainable material development: A comprehensive review of coir fiber and its composites. Mechanical Engineering for Society and Industry, 4(3), 415–454. https://doi.org/10.31603/mesi.12556.

Lopez-Arraiza, A., Essamari, L., Iturrondobeitia, M. et al. Life cycle assessment of glass fibre versus flax fibre reinforced composite ship hulls. Sci Rep 15, 16283 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-00811-y

Merta, I., Mladenovič, A., Turk, J., Šajna, A., & Mauko Pranjić, A. (2018). Avaliação do Ciclo de Vida de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras Naturais. Key Engineering Materials, 761, 204–209. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.761.204

Mohammed, A.A.; Nahazanan, H.; Nasir, N.A.M.; Huseien, G.F.; Saad, A.H. Calcium-Based Binders in Concrete or Soil Stabilization: Challenges, Problems, and Calcined Clay as Partial Replacement to Produce Low-Carbon Cement. Materials 2023, 16, 2020. https://doi.org/10.3390/ma16052020.

Santos, M. L. de J., & Casagrande, M. D. T. (2023). Estudo do Comportamento de um Solo Tropical Reforçado com Fibras Naturais de Coco. X Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. https://doi.org/10.55449/conresol.6.23.I-027.

Santos, M. L. de J., Lopes, M. M., Silva, A. B., Ferreira, J. W. dos S., & Casagrande, M. D. T. (2026). Mechanical performance and durability of açaí fibers as reinforcement in tropical clay soil. Journal of Natural Fibers, 23(1). https://doi.org/10.1080/15440478.2025.2595560.