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/COBRAMSEG2026.6/53

Agregados Reciclados e Pneus Inservíveis em Muros de Contenção Provisórios: Monitoramento de um Modelo Físico

Eric J .G. Markus
Engenheiro Civil, Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), São Caetano do Sul, Brasil, eric.markus@maua.br

Mateus P. Fleury
Professor Substituto, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil, mateus.fleury@ufscar.br

Rafael R. Plácido
Professor Doutor, Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), São Caetano do Sul, Brasil, rafael.plácido@imt.br

Mariana B. Juarez
Professora Doutora, Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), São Caetano do Sul, Brasil, mariana.juarez@imt.br

RESUMO: A geração progressiva de Resíduos de Construção e Demolição (RCDs) demanda soluções sustentáveis que possam viabilizar, por exemplo, o uso de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) que atendam tanto à redução de impactos ambientais quanto o desempenho técnico. Neste contexto, o presente trabalho objetiva avaliar o comportamento de um protótipo de muro de contenção provisório construído com RCD-R e pneus inservíveis. Para tanto, um modelo físico em escala reduzida foi construído em cinco camadas compactadas manualmente e submetido a carregamentos progressivos até atingir 20kPa. Os deslocamentos da face foram medidos através de marcos de referência dispostos em seu entorno, sendo estes monitorados durante o período construtivo e após término do carregamento. Após a execução do muro, o monitoramento dos deslocamentos continuou durante 60 dias com intuito de avaliar seu desempenho frente as condições climáticas locais. Os resultados demonstraram que, durante todo o período de monitoramento (construtivo, após o carregamento e sob condição climática local) não ocorreram deslocamentos significativos ou quaisquer instabilidades no faceamento do muro. Essa estabilidade evidencia a viabilidade técnica do uso de agregados reciclados e pneus inservíveis como solução provisória de contenção em aterro e reforça o potencial deste conjunto como solução sustentável para a engenharia geotécnica, contribuindo para a mitigação do descarte inadequado e para o avanço de práticas alinhadas à economia circular.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento, Contenção, Muro de Arrimo, Agregado Reciclado, Pneu Inservível.

ABSTRACT: The progressive generation of Construction and Demolition Waste (CDW) requires sustainable solutions capable of enabling, for instance, the use of Recycled Construction and Demolition Waste (RCDW) that meet both environmental impact reduction and technical performance requirements. In this context, the present study aims to evaluate the behavior of temporary retaining wall constructed using RCDW and waste tires. To this end, a prototype was built in five manually compacted layers and subjected to progressive loading up to 20 kPa. The displacements of the wall face were measured using reference markers installed around the structure, which were monitored during construction and after loading. The face displacements were monitored until 60 days after the end of construction to assess performance under local climatic conditions. The results demonstrated that, throughout the entire monitoring period (during construction, after loading, and under local environmental conditions), no significant displacements or instabilities were observed in the wall facing. This stability demonstrates the technical feasibility of using recycled aggregates and waste tires as a temporary containment solution in embankments and reinforces the potential of this system as a sustainable solution for geotechnical engineering, contributing to the mitigation of improper waste disposal and to the advancement of practices aligned with the circular economy.

KEYWORDS: Monitoring, Retaining Wall, Gravity Walls, Recycled Aggregate, Waste Tire.

1 INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos representa um dos grandes desafios globais, especialmente no Brasil, onde a geração de resíduos vem crescendo de forma constante nos últimos anos (ABRELPE, 2022). Esse cenário evidencia a necessidade de soluções técnicas que conciliem desempenho estrutural e sustentabilidade ambiental.

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCDs) são compostos, maioritariamente, por materiais minerais inertes como concreto, argamassa, tijolos e cerâmica (CONAMA, 2009). Embora possuam grande potencial de reutilização, sua composição heterogênea dificulta a reutilização eficiente desses materiais (Silveira; Ferreira, 2021), tornando necessária a adoção de outras estratégias de gestão, como a reciclagem. De forma semelhante, os pneus inservíveis representam um resíduo de difícil destinação, devido à sua durabilidade e não biodegradabilidade, sendo frequentemente associados a impactos ambientais e riscos à saúde pública quando descartados de forma inadequada (Lagarinhos et al., 2008).

Nesse contexto, a economia circular surge como um modelo capaz de integrar estratégias de reciclagem e reutilização, promovendo a redução do consumo de recursos naturais e a mitigação de impactos ambientais. A engenharia geotécnica apresenta-se como um campo promissor para a aplicação desses materiais alternativos, especialmente em obras de contenção, como muros de arrimo.

Muros de arrimo (ou de gravidade) são estruturas de contenção projetadas para estabilizar solos em declives por meio de seu peso próprio, prevenindo deslizamentos e garantindo a estabilidade do solo em diversas construções e infraestruturas (Gerscovich, 2010). Tais estruturas são, tipicamente, construídas com alvenarias de pedras, concreto armado ou gabiões. Recentemente, observa-se uma tendência crescente na literatura que visa diminuir o impacto ambiental dessas estruturas por meio da utilização de resíduos provenientes de outras indústrias (Arefnia; Dehghanbanadaki; Kassim, 2021; Pons et al., 2018), como o muro de contenção construído com pneus inservíveis no município de Itapira-SP (Figura 1).

Para avaliar a performance desses muros de gravidade, a norma NBR 11682 (ABNT, 2009) sugere a consideração do monitoramento geotécnico. Por meio de uma instrumentação com distintos tipos de equipamentos, é possível acompanhar os deslocamentos de uma estrutura geotécnica ao longo do tempo em diferentes condições de carregamento e do solo, utilizando os resultados como uma validação do comportamento da estrutura.

Este estudo se fundamenta no contexto das estratégias de reuso (pneus inservíveis) e reciclagem (RCD-R) explorando seu potencial como novas fontes de matéria-prima a serem reinseridas na construção civil. Portanto, o objetivo deste artigo é monitorar os deslocamentos de face de um protótipo de muro de contenção provisório submetido a carregamento estático e condições ambientais locais.



Figura 1. Muro de contenção construído com pneus inservíveis em Itapira-SP.
(Fonte: Prefeitura Municipal de Itapira, 2016).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Neste estudo foram utilizados dois materiais distintos: pneus inservíveis e resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R). Um total de 32 pneus inservíveis de veículos leves (exceto motocicletas), destinados para a coleta e descarte pela prefeitura de SP, foram fornecidos por uma borracharia da região metropolitana de São Paulo – SP. Os pneus possuem largura em torno de 200 mm e diâmetro externo de 680 mm, com um peso unitário de, aproximadamente, 7 kg. Como material de preenchimento do modelo, foi utilizado um agregado reciclado fornecido pela usina de reciclagem Urbem Tecnologia Ambiental, localizada no município de São Bernardo do Campo – SP. Segundo informações do fornecedor, os agregados são reciclados por meio de um único processo de britagem (britador de mandíbula) e posteriormente separados por peneirador mecânico.

2.2 Métodos

2.2.1 Caracterização da areia reciclada

Antes da execução do protótipo, foi realizada a caracterização completa da areia reciclada. Os seguintes ensaios foram realizados em uma amostra coletada do material fornecido: massa específica (NBR 6458; ABNT, 2025), granulometria por peneiramento e sedimentação (NBR 17504; ABNT, 2018), limites de plasticidade (NBR 6459; ABNT, 2016a) e liquidez (NBR 7180; ABNT, 2016b), compactação proctor com energia normal (NBR 7182; ABNT, 2016c) e cisalhamento direto com moldagem dos corpos de prova em umidade natural (6,8%) e ensaios realziados sob condição inundada e não inundada (ASTM D3080; 2023).

2.2.2 Construção do protótipo

A implantação do modelo foi feita a frente de um talude no campus São Caetano do Sul do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT). O preparo do terreno envolveu o posicionamento de tábuas de madeira acima da canaleta na base do talude, de modo a manter sua funcionalidade no sistema de drenagem da região. A face do talude foi coberta com lona plástica (Figura 2) para: i) viabilizar o lançamento da areia reciclada por deslizamento para alteamento do muro e ii) evitar que a areia reciclada fosse “contaminada” pelo material da superfície do talude (solo e serrapilheira).



Figura 2. Lona plástica sobre talude e instalação dos marcos referências para o plano de monitoramento.

A execução do muro envolveu a construção em camadas sucessivas, onde cada uma foi composta pelo posicionamento dos pneus, preenchimento desses com agregado reciclado em umidade natural (conforme recebida), compactação manual (com soquete de concreto) e disposição de geotêxtil não-tecido entre as camadas (somente na área de projeção dos pneus; da face) – com o objetivo de melhorar a distribuição de tensões e minimizar a perda de partículas finas. Em seguida, a areia reciclada foi transportada para a crista do talude e laçada sobre a lona para preencher o protótipo. Adotou-se o mesmo método de compactação usado para a areia reciclada que preencheu os pneus. Após o término da primeira camada, o processo foi repetido até que o muro atingisse a 5ª camada, resultando em uma altura aproximada de um metro. Cabe destacar que em cada camada foi posicionado um corpo de prova cilíndrico (5x10 cm) para a análise do grau de compactação atingido pelo processo construtivo adotado.

2.2.3 Carregamento do protótipo

Após a conclusão da construção, o modelo foi submetido a carregamento utilizando duas caixas d'água e três recipientes de plástico. O recipiente de plástico foi utilizado para calibrar o peso de areia reciclada inserido tanto na caixa d'água quanto no mesmo. Considerando o controle das massas inseridas nos recipientes (1.000 kg), e a área de projeção da caixa d'água (0,442m²), determinou-se a tensão de carregamento em que o protótipo foi submetido: 22,2 kPa. A Figura 3 apresenta o protótipo construído e carregado.



Figura 3. Modelo físico sobre carregamento.

2.2.4 Monitoramento dos deslocamentos da face

O monitoramento do muro consistiu na aferição da distância entre marcos de referência e pontos específicos na face do muro (pneus) utilizando-se uma trena metálica. A precisão das medidas foi de 0,5 mm. Foram adotados como marcos de referência indeslocáveis tubos de PVC (diâmetro nominal de 1"), cravados em frente a face do muro (Figura 4). Após conclusão de cada camada do muro, foram demarcados pontos nos marcos de referência com altura correspondente a metade da altura dos pneus de cada camada e a distância entre os pontos de referência no marco referencial e nos pneus foram medidas (Figura 5). Assim o monitoramento dos deslocamentos da face foi realizado durante i) a fase construtiva (alteamento de cada camada), ii) a aplicação do carregamento e iii) ao longo de sessenta dias após o carregamento total do protótipo.

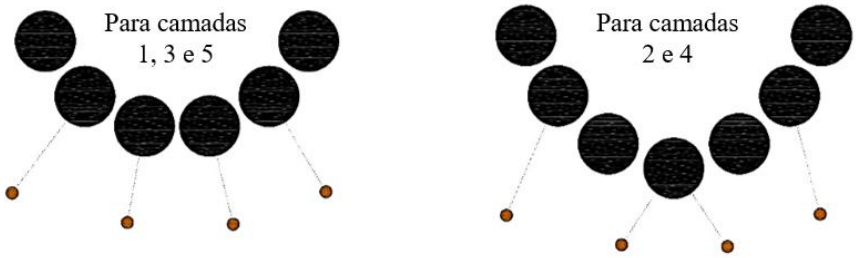
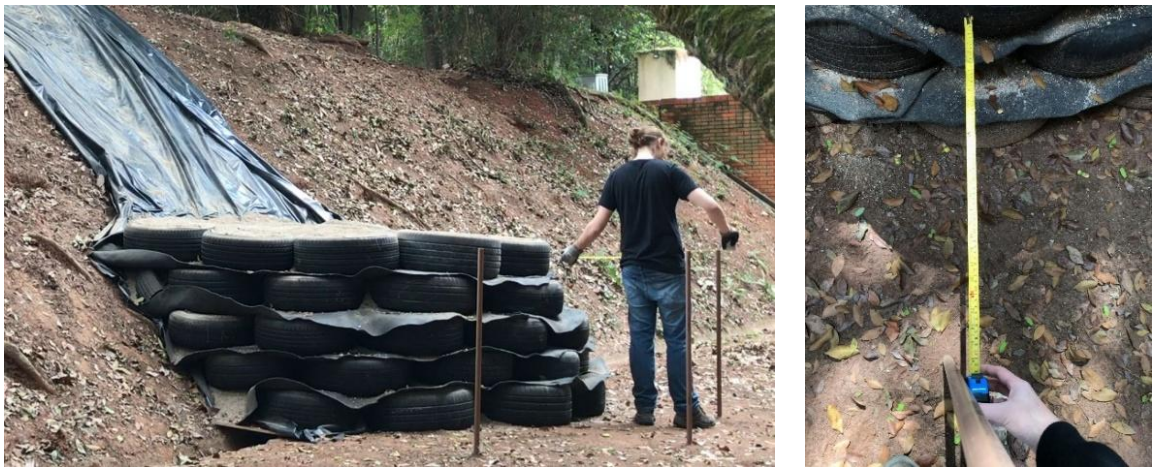


Figura 4. Desenho esquemático dos pontos instalados no faceamento para a medida dos deslocamentos.



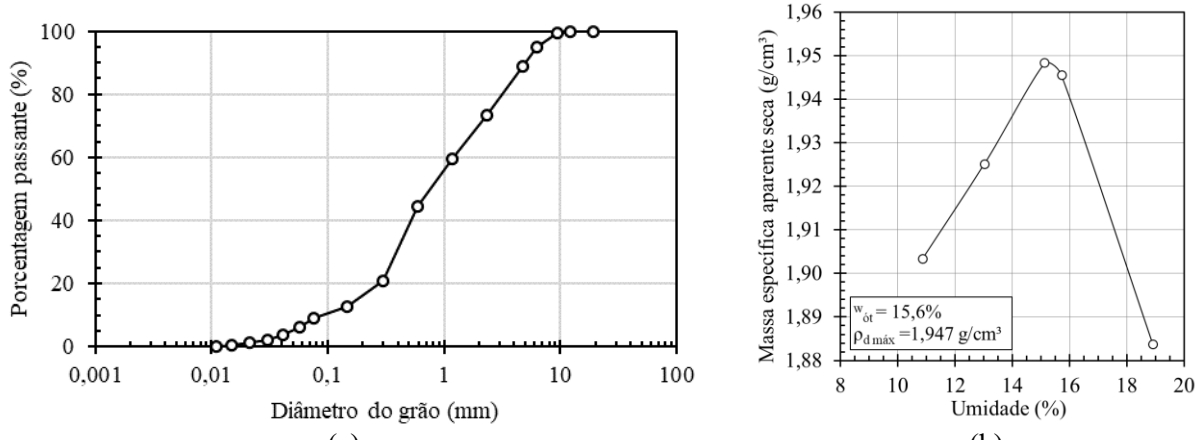
(a) (b)

Figura 5. Determinação das distâncias entre os pontos do marco de referência e da face (pneus).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização do Agregado Reciclado

O perfil granulométrico (Figura 6a) do material obteve um coeficiente de uniformidade de 15,7 e coeficiente de curvatura de 2,6. De acordo com o sistema unificado de classificação de solos (SUCS) estabelecido pela ASTM D2487-17 (ASTM, 2017), o agregado reciclado foi caracterizado como uma areia siltosa (SM).

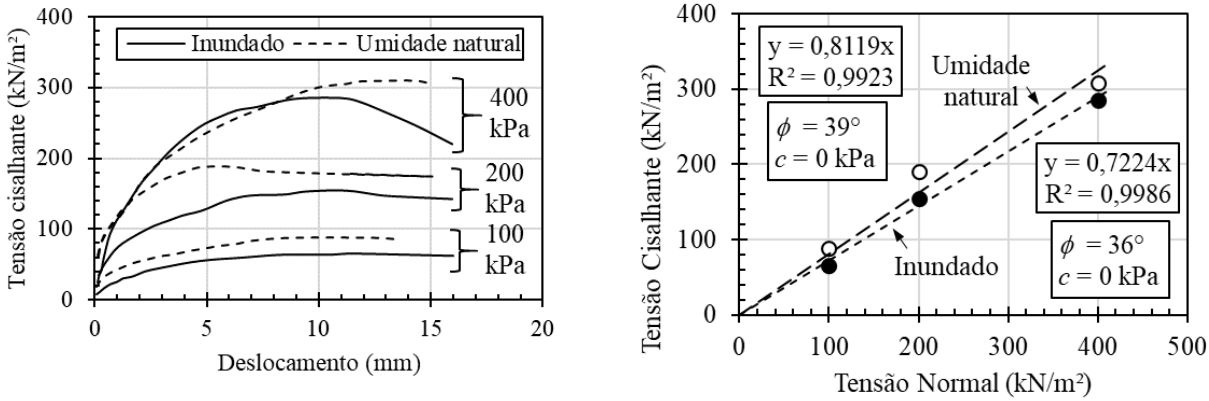


(a) (b)

Figura 6. Curvas (a) granulométrica e (b) de compactação.

O material obteve um valor para massa específica das partículas de 2,64 g/cm³, um valor próximo a agregados naturais (entre 2,5 e 2,75 g/cm³). A partir do ensaio de compactação (Figura 6b), o agregado reciclado obteve um valor de peso específico seco máximo de 1,947 g/cm³ e umidade ótima igual a 15,6%. Por se tratar de uma areia reciclada, o material comprovou ser não plástico, apesar de possuir cerca de 15% de material argiloso (grãos com dimensões inferiores a 0,02mm).

Os resultados exibidos na Figura 7 indicaram coesão nula independente da condição (inundado ou não inundado), comportamento compatível com agregados naturais arenosos. O ensaio na umidade natural obteve ângulo de atrito (ϕ) de 39º enquanto na condição inundada este parâmetro apresentou valor de 36º. Nota-se que os valores de tensão cisalhante obtidos nas condições de umidade natural foram superiores àqueles na condição inundada, independentemente do nível de tensão normal aplicada. Tal comportamento é esperado, pois a condição de inundação do ensaio aumenta a saturação e, consequentemente a poropressão. Assim, a interação entre as partículas diminui e o atrito intergranular é reduzido, resultando na redução da resistência ao cisalhamento do material.



(a) (b)

Figura 7. Resultados do ensaio de cisalhamento direto: curvas tensão-deformação e (b) envoltória de ruptura.

3.2. Monitoramento de face do protótipo construído

O período de monitoramento do modelo físico teve início durante a etapa de construção, em 19 de agosto de 2025, estendendo-se até a última medição da distância entre o faceamento e os marcos referenciais, realizada em 3 de novembro de 2025. Durante o período de monitoramento pós carregamento, recorreu-se à Estação Automática de Monitoramento de Ipiranga-SP (V0702) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para identificar as temperaturas máximas e mínimas, umidade média e precipitação. O referido ponto de monitoramento dista 1,82km do IMT. A Figura 8 apresenta essas informações ao longo do período de análise (sessenta dias).

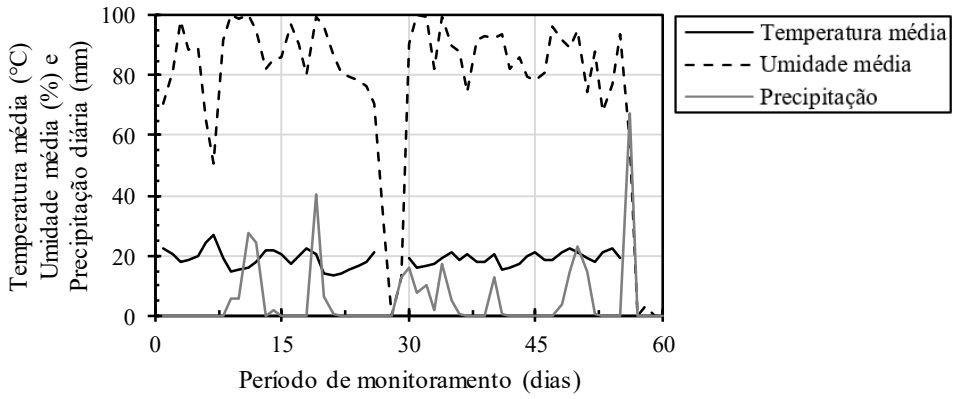


Figura 8. Temperatura média, umidade média e precipitação diária durante o período de monitoramento dos deslocamentos da face do muro após carregamento.

Ao final do período de monitormaento, foi removido da última camada executado o corpo de prova para a avaliação do grau de compactação atingido pela construção do modelo, que resultou em uma densidade de compactação de 1,44 g/cm³ e grau de compactação de 74%. Ressalta-se que este é um baixo grau de compactação comparado aos comumente adotados em aterros (GC ≥ 95%). Contudo, o menor grau de compactação atingido culmina em menor rigidez do protótipo o que favoreceria a maior deformabilidade do mesmo. Assim, apesar do carregamento de, aproximadamente, 20 kPa e das variações ambientais registadas (Figura 8), as medições efetuadas ao longo do período apresentaram valores idênticos àqueles obtidos nas leituras iniciais, evidenciando deslocamento praticamente nulo do faceamento – em verdade inferior aa margem de erro utilziada na medição (0,5mm). Ademais, a ausência de quaisquer indícios de instabilidade local ou global no muro reforça a conclusão quanto à estabilidade do sistema construído.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar, por meio de um protótipo de pequeno porte, o desempenho de um muro de contenção provisório composto por agregado reciclado e faceamento de pneus inservíveis. Os resultados levaram as seguintes conclusões:

- A caracterização física do agregado reciclado usado como material de preenchimento do aterro demonstrou uma natureza predominantemente arenosa, obtendo uma classificação de areia siltosa, caráter não plástico, comportamento não coesivo e ângulo de atrito entre 36° e 39°; e

- Ao longo do período de monitoramento de 76 dias, o modelo apresentou comportamento estável, sem deslocamentos significativos no faceamento, o que indica a viabilidade do o agregado reciclado e pneus inservíveis em muros de contenção provisórios.

A pesquisa foi desenvolvida no contexto da busca por soluções sustentáveis que conciliem desempenho técnico e reaproveitamento de resíduos sólidos, especialmente os de construção e demolição (RCDs) e os pneus descartados. Os resultados obtidos neste trabalho demonstram a viabilidade técnica da solução composta por agregados reciclados e pneus inservíveis, reforçando seu potencial como alternativa sustentável para obras geotécnicas temporárias ou definitivas para obras de pequeno porte.

Para aprimorar a avaliação dessa solução, recomenda-se a realização de estudos complementares, tais como a aplicação de carregamentos maiores até a ruptura do modelo, ou o aumento da altura do modelo, de modo a reduzir seu fator de segurança e submeter a estrutura a empuxos mais representativos de condições reais de projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2025). NBR 6458. *Solos — Determinação de massa específica.*
Associação Brasileira De Normas Técnicas (2016a). NBR 6459. *Solos — Determinação do limite de liquidez.*
Associação Brasileira De Normas Técnicas (2016b). NBR 7180. *Solos — Determinação do limite de plasticidade.*
Associação Brasileira De Normas Técnicas (2016c). NBR 7182. *Solo — Ensaio de compactação.*
Associação Brasileira De Normas Técnicas (2018). NBR 17054. *Solo — Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio.*
ASTM International (2023). ASTM D3080/D3080M: *Direct shear test of soils under consolidated drained conditions.*
ASTM International (2017). ASTM D2487-17:2017: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes – Unified Soil Classification System.*
ABRELPE (2022) *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022*. Disponível em: <https://abespb.com.br/wp-content/uploads/2023/12/Panorama_Abrelpe_2022.pdf>. Acesso em: 1 abr. 2025.
CONAMA (2009). *Resolução CONAMA nº 416, de 30 de setembro de 2009*. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente.

FLEURY, Mateus P. et al (2024). *Durability of geosynthetics in reinforced structures using recycled construction and demolition waste as backfill material: in-isolation and successive effects*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAPIRA. *Uso de pneus velhos em recuperação de encosta reduz impacto ambiental.* Itapira, 2016. Disponível em: https://itapira.sp.gov.br/noticia/uso-de-pneus-velhos-em-recuperacao-de-encosta-reduzem-impacto-ambiental/6112. Acesso em: 4 maio 2025.

Lagarinhos F., Tenório S. (2008). *Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 18, n. 2, p. 106–118. DOI: 10.1590/S0104-14282008000200007.

Silveira, A., Ferreira L. (2021). *Economia circular no setor da construção civil*. Revista Prociências, v. 2, n. 1, p. 91–103. DOI: 10.15210/rp.v2i1.20368.