

Avaliação da Eficiência de Blocos Vazados, Pneus Obsoletos e Capim Vetiver como Soluções Integradas de Controle de Erosão em Encostas da Ponte-Cais de Morrumbene, Moçambique

Helio Geraldo Ubisse

UFT

<https://orcid.org/0009-0001-7774-5153>

Levin Cuinica

UnSave

Resumo: A erosão hídrica em encostas urbanas representa um desafio crescente para a sustentabilidade ambiental e a segurança de infraestruturas em diversas regiões de Moçambique. Na vila de Morrumbene, província de Inhambane, a degradação acelerada de taludes próximos à ponte-cais tem gerado impactos significativos, especialmente durante o período chuvoso. O objectivo deste estudo foi avaliar a eficácia integrada de uma solução híbrida e de baixo custo para a contenção da erosão pluvial em uma encosta crítica perto da ponte-cais de Morrumbene. O referencial teórico validou a sinergia entre o reforço estrutural de materiais reutilizáveis (pneus e blocos vazados) e o reforço do solo e dissipação de energia proporcionados pelo sistema radicular do Capim Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). A metodologia adotada foi qualitativa e retrospectiva, baseada em um estudo de caso e num rigoroso controlo de qualidade pós-intervenção, focado na observação sistemática e no cálculo de indicadores de desempenho. Os resultados demonstraram um sucesso técnico excepcional: o Índice de Estabilidade Estrutural (IEE) alcançou 99.31% (acima do critério de aceitação de 90%), e a Taxa de Sucesso de Estabelecimento Biológico (TSEB) do Capim Vetiver foi de 98.96%. A discussão confirmou que o sucesso estrutural imediato (IEE) criou a plataforma estável necessária para a multiplicação do vetiver, validando a complementaridade híbrida da solução e demonstrando que as poucas falhas localizadas são passíveis de correção biológica. A conclusão é que o modelo de intervenção de Morrumbene é altamente eficaz, transformando resíduos em infraestrutura resiliente. Recomenda-se a padronização e replicação desta tecnologia de bioengenharia de baixo custo, bem como a adopção do IEE como métrica de controlo de qualidade em futuros projetos em Moçambique.

Palavras-chave: Bioengenharia de Baixo Custo; Capim Vetiver; Erosão Pluvial; Pneus Obsoletos; Controlo de Qualidade.



Recebido em: junho. 2025. Aceito em: outubro. 2025

DOI: 10.56069/2676-0428.2025.720

Constelações do Presente: Coletânea Multitemática de Pesquisa

Novembro, 2025, v. 3, n. 33

Periódico Multidisciplinar da FESA Educacional

ISSN: 2676-0428



Evaluación de la eficiencia de bloques huecos, neumáticos obsoletos y hierba vetiver como soluciones integradas de control de la erosión en las laderas del muelle de Morrumbene, Mozambique

Resumen: La erosión hídrica en las laderas urbanas representa un desafío creciente para la sostenibilidad ambiental y la seguridad de la infraestructura en varias regiones de Mozambique. En la aldea de Morrumbene, provincia de Inhambane, la degradación acelerada de las laderas cercanas al muelle ha generado impactos significativos, especialmente durante la temporada de lluvias. El objetivo de este estudio fue evaluar la efectividad integrada de una solución híbrida y de bajo costo para la contención de la erosión pluvial en una pendiente crítica cerca del muelle de Morrumbene. El marco teórico validó la sinergia entre el refuerzo estructural de materiales reutilizables (neumáticos y bloques huecos) y el refuerzo del suelo y la disipación de energía proporcionada por el sistema radicular de la hierba vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). La metodología adoptada fue cualitativa y retrospectiva, basada en un estudio de caso y un riguroso control de calidad posterior a la intervención, centrado en la observación sistemática y el cálculo de indicadores de desempeño. Los resultados demostraron un éxito técnico excepcional: el Índice de Estabilidad Estructural (ISR) alcanzó el 99,31% (por encima del criterio de aceptación del 90%), y la Tasa de Éxito del Establecimiento Biológico (TSEB) de la Hierba Vetiver fue del 98,96%. La discusión confirmó que el éxito estructural inmediato (IEE) creó la plataforma estable necesaria para la multiplicación del vetiver, validando la complementariedad híbrida de la solución y demostrando que las pocas fallas localizadas son susceptibles de corrección biológica. La conclusión es que el modelo de intervención de Morrumbene es altamente efectivo, transformando los residuos en infraestructura resiliente. Se recomienda estandarizar y replicar esta tecnología de bioingeniería de bajo costo, así como adoptar la EEI como métrica de control de calidad en futuros proyectos en Mozambique.

Palabras clave: Bioingeniería de Bajo Costo; Hierba de Vetiver; Erosión Pluvial; Neumáticos Obsoletos; Control de Calidad.

Efficiency Assessment of Hollow Blocks, Obsolete Tires, and Vetiver Grass as Integrated Erosion Control Solutions on the Slopes of Morrumbene Pier, Mozambique

Abstract: Water erosion on urban hillsides represents a growing challenge to environmental sustainability and infrastructure security in several regions of Mozambique. In the village of Morrumbene, Inhambane province, the accelerated degradation of the slopes near the pier has generated significant impacts, especially during the rainy season. The objective of this study was to evaluate the integrated effectiveness of a hybrid and low-cost solution for the containment of rainfall erosion on a critical slope near the Morrumbene quay. The theoretical framework validated the synergy between the structural reinforcement of reusable materials (tires and hollow blocks) and the soil reinforcement and energy dissipation provided by the root system of the vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*). The methodology adopted was qualitative and retrospective, based on a case study and rigorous post-intervention quality control, focused on systematic observation and calculation of performance indicators. The results demonstrated exceptional technical success: the Structural Stability Index (SRI) reached 99.31% (above the 90% acceptance criterion), and the Biological Establishment Success Rate (TSEB) of Vetiver Grass was 98.96%. The discussion confirmed that immediate structural success (IEE) created the stable platform needed for vetiver multiplication, validating the hybrid complementarity of the solution and demonstrating that the few localized faults are susceptible to biological correction. The conclusion is that Morrumbene's intervention model is highly effective, transforming waste into resilient infrastructure. It is recommended to standardize and replicate this low-cost bioengineering technology, as well as to adopt the IES as a quality control metric in future projects in Mozambique.

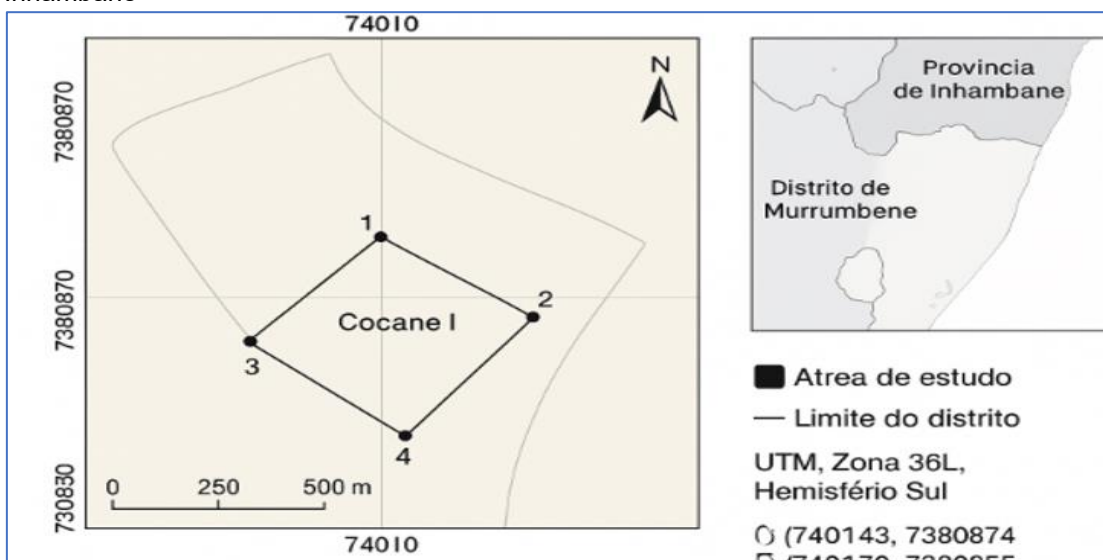
Keywords: Low-cost Bioengineering; Vetiver Grass; Rainfall Erosion; Obsolete Tires; Quality Control.

INTRODUÇÃO

A erosão do solo representa um dos desafios ambientais mais prementes em Moçambique, particularmente em áreas costeiras e encostas sujeitas a eventos pluviométricos intensos e à acção de agentes erosivos como o vento e a água (MICOA, 2007). A degradação de taludes e encostas não apenas compromete a estabilidade do terreno, ameaçando infraestruturas e comunidades, mas também contribui para a perda de solo fértil, sedimentação de corpos d'água e diminuição da biodiversidade (Portocarrero *et al.*, 2006; Vieira, 2008).

Na Vila de Morrumbene, Província de Inhambane, o problema da erosão hídrica atingiu uma severidade particular na encosta localizada nas proximidades da ponte-cais e no Bairro Cocane I (Figura 1). Esta área, devido à sua proximidade com infraestruturas vitais e ao seu posicionamento na interface terra-mar, apresentava um risco elevado de deslizamento e colapso, colocando em perigo tanto a integridade da ponte-cais quanto a segurança das comunidades que vivem na sua base.

Figura 1: Localização Geográfica do Bairro Cocane I, Distrito de Morrumbene, Província de Inhambane



Tradicionalmente, diversas abordagens têm sido empregadas para mitigar a erosão, em particular nas taludes, variando de soluções puramente de engenharia civil a técnicas de bioengenharia (Silva, 2016; Carneiro et al., 2021).

No entanto, o custo e a sustentabilidade de certas intervenções frequentemente limitam sua aplicabilidade em contextos com recursos restritos. A busca por soluções inovadoras, de baixo custo e ecologicamente sustentáveis tem impulsionado a exploração de abordagens híbridas que combinam elementos estruturais com técnicas de revegetação (Martins et al., 2022).

Neste contexto, a utilização de materiais reciclados ou de baixo custo, como pneus descartados/obsoletos, em conjunto com elementos de engenharia e espécies vegetais adaptadas, como o capim *vetiver* (*Chrysopogon zizanioides*), surge como uma alternativa promissora. O capim *vetiver* é amplamente reconhecido pela sua capacidade de formar densas barreiras vegetais e pelo seu profundo e fibroso sistema radicular, que confere notável estabilidade ao solo (Rodrigues, 1995; Baroni et al., 2012; Braun, 2018).

A estabilidade de taludes é garantida pela verificação dos fatores de segurança contra deslizamento e tombamento (Gerscovich *et al.*, 2016). Em contenções de baixo custo, como os muros de pneus, a solução deve oferecer a resistência mecânica necessária para suportar o empuxo do solo (Baroni *et al.*, 2012; Souza *et al.*, 2018), garantindo o controle de assentamento e alinhamento da estrutura.

Recentemente, a encosta adjacente à ponte-cais da Vila-sede de Morrumbene, bairro Cocane I, foi alvo de uma intervenção do setor ambiental local, que implementou uma solução híbrida de contenção de erosão. Esta solução combinou a instalação de blocos vazados, o uso de pneus obsoletos preenchidos de solo e o plantio de capim *vetiver* (DPDTA, 2023).

JUSTIFICATIVA

Face à severidade do processo erosivo e às limitações orçamentais inerentes a projectos de infraestrutura em contextos de desenvolvimento, as soluções de engenharia civil convencionais (como muros de betão armado) têm-se revelado dispendiosas e, por vezes, inadequadas para a recuperação ecológica de longo prazo (Durlo & Sutili, 2014). A escolha por abordagens de baixo custo é crucial, pois a disponibilidade local de material resulta em ganhos práticos de economia e exequibilidade da obra (Durlo & Sutili, 2014).

Neste contexto, justificou-se a implementação de uma solução híbrida que combina a eficiência da engenharia estrutural de baixo custo com a sustentabilidade da bioengenharia (Dhital, Kayastha & Shi, 2012). A bioengenharia, por sua vez, é um campo interdisciplinar que conjuga o uso de um elemento vivo na engenharia, sendo fundamental para a estabilização de taludes o emprego de técnicas mistas, onde a engenharia e a vegetação são complementares (Jardim, 2017; Neres, Lima & Rodrigues, 2022).

A componente reciclagem e reutilização nas intervenções, como é o caso de Morrumbene, recorre muitas vezes ao uso de pneus obsoletos preenchidos com solo, atuando como micro-muros de gravidade e contentores de sedimento, resolvendo simultaneamente um problema de resíduos sólidos, e o uso de carcaças de pneus na engenharia civil demonstra ser uma solução criativa e viável para estruturas de contenção (DPDTA, 2023; Baroni, Specht & Pinheiro, 2012).

Os blocos vazados participam na protecção estrutural para dissipar a energia do impacto directo das gotas de chuva (*splash*) e reduzir o escoamento superficial e a dissipação do escoamento é essencial, pois a água, quando não controlada por estruturas ou vegetação, tende a concentrar-se e ganhar energia, gerando processos erosivos e o capim vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), reconhecido pelas suas raízes profundas e fortes aumentam a estabilidade do talude e melhora a infiltração da água no solo, que fornecem um reforço orgânico permanente ao solo (Durlo & Sutili, 2014; Jardim, 2017; DPDTA, 2023).

O presente estudo visa, portanto, avaliar a eficácia integrada desta solução híbrida. A sua importância reside na potencialidade de estabelecer um modelo replicável e de baixo custo que utilize materiais acessíveis e técnicas sustentáveis (Verdum, Vieira & Caneppele, 2016), demonstrando que obras simples de Engenharia Natural são capazes de controlar os processos de erosão e de sedimentação (Durlo & Sutili, 2014), fundamental para a gestão de riscos e adaptação às alterações climáticas nas vulneráveis zonas costeiras de Moçambique.

Com base nos princípios de baixo custo, sustentabilidade e disponibilidade local, a intervenção utilizou materiais selecionados para serem replicáveis em Moçambique e focar na contenção da erosão e recuperação do

ecossistema, tendo-se blocos vazados de produção local em Morrumbene (obtidos via concurso público em 2023) para facilitar o plantio de vegetação (DPDTA, 2023)

Os pneus reutilizados de veículos em desuso ou resíduos (recolhidos em campanha de 2023) pela sua durabilidade, flexibilidade e duplo propósito de contenção física e gestão de resíduos sólidos, e mudas de capim *vetiver*, obtidas em viveiros estabelecidos em Homoine, cujo uso já está estabelecido pela Administração Nacional de Estradas (ANE) para controlo de erosão (DPDTA, 2023).

Embora a intervenção tenha sido concebida com base em princípios técnicos, a ausência de um monitoramento científico sistemático prévio à sua implementação e a escassez de documentação cartográfica detalhada representam lacunas no entendimento de sua eficácia.

REFERENCIAL TEÓRICO

O estudo tem o referencial teórico a engenharia de sustentabilidade, que abrange a análise da intervenção de talude com erosão usando modelos híbridos, integrando recursos técnicos de baixo e bioengenharia, em contextos de desenvolvimento, onde as soluções convencionais são frequentemente insustentáveis.

No contexto do referencial percebe-se que a dimensão ambiental da sustentabilidade é alcançada através de duas vias complementares, a economia circular e a resiliência ecológica, através do uso de pneus obsoletos (Pneus em Fim de Vida – PFV) insere o projeto no conceito de economia circular. Um passivo ambiental de grande impacto e difícil decomposição é transformado num activo de engenharia. Os pneus, preenchidos com solo, funcionam como elementos de solo reforçado e de contenção de baixo custo, mitigando a poluição e reduzindo a dependência de materiais de construção virgens, cuja extração é onerosa e ambientalmente agressiva.

Por outro lado, na mesma perspectiva, a sustentabilidade é reforçada pelo elemento biológico, o Capim Vetiver é o pilar da infraestrutura viva, uma solução que se fortalece com o tempo. Suas raízes profundas e densas formam uma verdadeira armadura biológica no solo, aumentando a resistência ao

cisalhamento e atuando na melhoria das propriedades hídricas do talude. Esta vegetação confere resiliência ecológica à encosta, um fator essencial na adaptação às alterações climáticas. Os blocos vazados, por sua vez, fornecem a protecção superficial imediata, dissipando a energia cinética da precipitação, impedindo a chuva desagregar o solo, protegendo o talude enquanto o Vetiver se estabelece. Este sistema, ao controlar o escoamento superficial e evitar a formação de ravinas, promove a conservação do solo e dos serviços ecossistêmicos associados à cobertura vegetal.

A eficácia do modelo transcende o aspecto técnico, enquadrando-se nas dimensões económica e social da sustentabilidade, cruciais para a sua aplicação em regiões com recursos limitados, sendo solução intrinsecamente de baixo custo. A utilização de resíduos (pneus) e de vegetação facilmente propagável (Capim Vetiver) reduz drasticamente o investimento em comparação com estruturas de betão armado. Esta acessibilidade económica garante que a intervenção seja uma opção viável para o planeamento urbano em Moçambique.

O escopo do referencial teórico é bastante claro também na vertente social, onde a simplicidade construtiva do modelo é a chave para a replicação e autonomia. A técnica de contenção com pneus e o plantio de Vetiver exigem mão-de-obra local e ferramentas básicas, permitindo o envolvimento e a capacitação da comunidade na execução e manutenção da infraestrutura. Ao promover a autossuficiência na gestão de riscos e utilizar recursos locais, o projeto estabelece um modelo de desenvolvimento socialmente responsável.

Em suma, a solução híbrida de Morrumbene é um exemplo de Engenharia de Sustentabilidade, pois integra funcionalidade geotécnica com os imperativos ambientais e socioeconómicos, transformando a gestão de resíduos e a bioengenharia numa solução duradoura para a estabilização de encostas.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO

O presente estudo adota uma abordagem metodológica qualitativa e retrospectiva, configurando-se como um estudo de caso focado na encosta adjacente à ponte-cais da Vila de Morrumbene. A natureza retrospectiva desta pesquisa é inerente ao facto de a intervenção ter sido implementada previamente

em 2023, sem um protocolo de monitoramento contínuo estabelecido ou a coleta de dados quantitativos de linha de base (pré-intervenção). Consequentemente, a avaliação foca-se na observação do estado actual da encosta e na inferência de mudanças a partir da comparação com informações históricas disponíveis. A avaliação da eficácia baseou-se na análise descritiva e interpretativa, focada na observação do estado actual da encosta e na inferência de mudanças através da comparação com dados históricos, nomeadamente a informação constante de Relatório de 2023 do sector do ambiente.

O levantamento de campo para colecta de dados observacionais foi realizado em 15 de julho de 2025 e para o registo das observações, utilizou-se um telefone móvel para a documentação fotográfica detalhada (registando as imagens do local intervencionado), a fita-métrica para a determinação das zonas de contagem de materiais estruturais e avaliação do capim, assim como um aparelho de GPS portátil (Garmin, GPSMAP64s) para a anotação manual das coordenadas geográficas. O mapa de localização da área de estudo foi subsequentemente elaborado no software ArcGIS Desktop versão 10.8, utilizando as coordenadas colectadas para georreferenciar as informações de campo.

A técnica principal de colecta foi a Observação Visual Sistemática de toda a área intervencionada (cerca de 91 m²) com foco nos seguintes aspectos: Integridade Estrutural das Unidades de Contenção (blocos e pneus), para o registo de falhas e deslocamentos; Vigor e Resiliência do Capim Vetiver; Sinais de Erosão e Eficácia na Retenção de Sedimentos.

Para a avaliação da integridade física (o controlo de qualidade), o dado bruto para o Índice de Estabilidade Estrutural (IEE) desenvolvido como uma métrica de controlo de qualidade pós-intervenção, focada na durabilidade e integridade dos elementos. Embora não se baseie em factores de segurança geotécnicos clássicos (Gerscovich et al., 2016), este índice quantifica a conformidade física da estrutura (Ulrich, 2001), sendo definido pela percentagem de unidades (pneus e blocos) que não apresentam dano ou deslocamento visível, mostrando-se bastante útil para atestar a viabilidade e a estabilidade imediata de solução de engenharia de baixo custo (Baroni et al., 2012) e permite

a correcta instalação e o sucesso da componente de bioengenharia (Durlo & Sutili, 2014), segundo a fórmula abaixo.

$$\text{Índice de estabilidade estrutural (\%)} = \frac{\text{Total estável (Nblocos_est+Npneus_est)}}{\text{Total inspeccionado (blocos+pneus)}} \times 100$$

Onde Nblocos_est: Número de blocos estáveis, isto é, sem nenhuma danificação
Npneus_est: Número de pneus estáveis sem deslocamento.

Neste trabalho a obtenção do IEE foi feita através do registo directo do número total de unidades instáveis (com dano ou deslocamento) num universo de 578 unidades (pneus e blocos vazados). Este valor foi usado numa análise de Controlo de Qualidade Pós-Construção, calculando a percentagem de unidades que se mantiveram íntegras.

Por sua vez, a Taxa de Sucesso de Estabilidade Biológica (TSEB) é dada pela fórmula abaixo.

$$\text{Taxa de Sucesso de Estabelecimento Biológico (\%)} = \frac{\text{Número total de touceiras(cordões)viáveis}}{\text{Número total estimado de mudas plantadas}} \times 100$$

A TSEB complementa a avaliação estrutural, fornecendo evidências para a eficácia a longo prazo, cuja unidade básica de contagem para a TSEB são as mudas de capim *vetiver* que foram plantadas dentro dos blocos vazados e pneus. A metodologia indica que foi plantado “geralmente dois ou três caules por cada material” (DPDTA, 2023). A observação de campo focou no vigor e resiliência do capim *vetiver*, avaliando a saúde geral das plantas (cor, densidade) e a percentagem de cobertura vegetal.

RESULTADOS E ANÁLISE DA ESTABILIZAÇÃO

CONDIÇÃO DA ENCOSTA PRÉ-INTERVENÇÃO

A condição inicial da encosta, conforme demonstrado pela imagem (Figura 2) e pelos dados históricos, apresentava uma fragilidade geomorfológica severa, marcada pela ocorrência de erosão em sulcos profundos e avançados e exposição significativa do solo (Verdum et al., 2014). A carência de vegetação robusta implicava uma baixa resistência ao cisalhamento superficial e a consequente perda progressiva de massa, justificando a intervenção com a solução híbrida de baixo custo.

Figura 2. Estado da área de estudo na fase pré-intervenção



Fonte: DPDTA (2023).

AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL: O ÍNDICE DE ESTABILIDADE ESTRUTURAL (IEE)

A estabilidade da estrutura de contenção foi quantificada pelo Índice de Estabilidade Estrutural (IEE), uma métrica de Controle de Qualidade Pós-Construção. O levantamento de campo cobriu as 578 unidades instaladas (287

blocos e 291 pneus) e registou um total de 4 unidades instáveis: 3 pneus com erosão subjacente e 1 bloco deslocado.

O cálculo do IEE foi procedido da seguinte forma como se ilustra abaixo:

$$IEE = \left(\frac{578-4}{578} \right) \times 100 = 99.31\%$$

O resultado de 99.31% supera significativamente o critério de aceitação de 90%, confirmando a viabilidade técnica e a integridade da estrutura de baixo custo (Baroni et al., 2012). A elevada integridade da estrutura demonstra que os requisitos de estabilidade funcional foram cumpridos (Gerscovich et al., 2016). O facto de apenas 0.69% das unidades terem apresentado instabilidade atesta que a metodologia de construção, mesmo sendo de baixo custo, pode atingir um padrão de controlo de qualidade elevado.

O desempenho da componente de bioengenharia foi avaliado pela Taxa de Sucesso de Estabelecimento Biológico (TSEB) do capim *vetiver*, com base no registo de apenas 6 unidades com falha de estabelecimento biológico em 578 unidades plantadas, com o resultado de 98.96% valida a eficácia da técnica de plantio e a escolha do capim, se bem que houve sucessão de alguma vegetação arbustiva. As evidências fotográficas (Figura 3) mostram a formação de touceiras densas e robustas, o que assegura que a estabilização biológica de longo prazo está em curso (Durlo & Sutili, 2014).

A resiliência e a capacidade de formação de uma densa rede radicular por esta gramínea são fundamentais para a continuação do processo de estabilização da encosta.

Figura 3. Evidências pós-intervenção do talude



Fonte: DPDTA (2023)

INFERÊNCIA DE EFICÁCIA FUNCIONAL DA SOLUÇÃO HÍBRIDA

A análise conjugada dos resultados demonstra a funcionalidade da solução híbrida (o IEE 99.31%) garante a contenção de massa inicial, enquanto a TSEB (98.96%) inicia a protecção de superfície.

As falhas localizadas (erosão subjacente nos pneus) são o tipo de processo que o Capim Vetiver, com a sua densidade de touceira, é projectado para corrigir e prevenir. Deste modo, o sucesso estrutural inicial é a base que permite o correcto estabelecimento do Vetiver (Durlo & Sutili, 2014), tornando a solução verdadeiramente híbrida e eficaz na mitigação de falhas físicas e biológicas ao longo do tempo.

CONCLUSÃO

A intervenção na encosta adjacente à ponte-cais de Morrumbene alcançou plenamente o objetivo de avaliar a eficácia integrada de uma solução híbrida de contenção da erosão pluvial. O estudo demonstrou que a combinação de blocos vazados, pneus obsoletos e capim vetiver constitui uma alternativa de bioengenharia sustentável, economicamente viável e tecnicamente eficiente para as condições locais.

A análise evidenciou que o uso de materiais de baixo custo e de fácil obtenção é potencializado pelas propriedades biofísicas do capim vetiver, cujo sistema radicular reforça o solo e contribui para a dissipação das águas superficiais. Essa integração entre contenção física imediata e estabilização biológica de longo prazo mostrou-se essencial para o controle efetivo da erosão.

A comparação entre o estado inicial caracterizado por erosão severa e solo exposto e o estado pós-intervenção confirmou melhorias significativas na estabilidade estrutural da encosta. O Índice de Estabilidade Estrutural (IEE) de 99,31% superou amplamente o limite de desempenho esperado, evidenciando a qualidade da execução e a capacidade da estrutura de resistir às solicitações hidrodinâmicas. Paralelamente, o elevado nível de estabelecimento do capim vetiver (TSEB de 98,96%) demonstrou o sucesso da componente biológica da solução.

As poucas falhas pontuais observadas são consideradas naturais nesta fase inicial e tendem a ser mitigadas com o crescimento contínuo das touceiras, que reforçarão a cobertura vegetal e a resistência global do sistema.

Conclui-se que o modelo aplicado em Morrumbene representa uma solução de engenharia ambiental de baixo custo, alto desempenho e grande potencial de replicação em outros contextos sujeitos à erosão pluvial, contribuindo para práticas sustentáveis de estabilização de encostas em Moçambique.

RECOMENDAÇÕES

Com o intuito de Generalizar as lições de Morrumbene e garantir a sustentabilidade e replicação do modelo, são formuladas as seguintes recomendações:

A) Técnicas para a Sustentabilidade da Intervenção:

- ✓ Implementar um protocolo de monitoramento regular (semestral) para a TSEB e o vigor do Capim *vetiver*, assegurando a substituição imediata de qualquer falha na formação de touceira, especialmente nas áreas onde se registaram falhas estruturais (pneus instáveis).
- ✓ Realizar a remoção controlada do excesso de sedimentos acumulados a montante dos pneus e blocos. Embora a retenção de sedimentos seja um sinal de eficácia, o acúmulo excessivo pode comprometer o desenvolvimento das touceiras mais baixas.
- ✓ Considerar, nas áreas onde os pneus apresentaram erosão subjacente (3 unidades), a adição de uma camada de reforço biológico ou geotêxtil antes da recolocação do solo, prevenindo o esvaziamento superficial e a instabilidade futura.

B) Políticas e de Replicação do Modelo:

- ✓ Promover o modelo de contenção com blocos vazados, pneus e Capim Vetiver como solução padronizada de bioengenharia de baixo custo para a Administração Nacional de Estradas (ANE) e autoridades municipais, especialmente em taludes urbanos com alto risco de erosão.
- ✓ Fomentar a criação de viveiros comunitários de Capim Vetiver e estabelecer parcerias com oficinas e comunidades para a recolha sistemática e estruturada de pneus, institucionalizando o fluxo de materiais reutilizáveis e transformando um problema de resíduos sólidos numa solução de infraestrutura.
- ✓ Incluir o cálculo do IEE nos termos de referência de futuros projetos de bioengenharia. Esta métrica de controlo de qualidade é essencial para

garantir que as soluções de baixo custo mantêm um elevado padrão de estabilidade e durabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARONI, M.; SPECHT, L. P.; PINHEIRO, R. J. B. Construção de estruturas de contenção utilizando pneus inservíveis: análise numérica e caso de obra. **Rem:** Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 65, n. 4, p. 449-457, 2012. DOI: 10.1590/S0370-44672012000400012.

DHITAL, Y. P.; KAYASTHA, R. B.; SHI, J. Soil bioengineering application and practices in Nepal. *Environmental Management*, v. 51, n. 2, p. 354-364, 2012.

DIRECÇÃO PROVINCIAL DE DESENVOLVIMENTO TERRITORIAL E AMBIENTE (DPDTA). **Relatório do Dia Mundial do Ambiente**. Inhambane, Moçambique, 2023.

DURLO, M. A.; SUTILI, F. J. **Bioengenharia: manejo biotécnico de cursos de água**. 3. ed. rev. Santa Maria, RS: Edição do Autor, 2014.

JARDIM, L. S. O. V. **Análise de estabilidade de taludes em encostas revestidos com capim vetiver: estudo de caso em Teutônia/RS**. 2017. Monografia (Projeto Final) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

NERES, P. D.; LIMA, J. A.; RODRIGUES, C. R. Análise do uso de vegetação na contenção de taludes. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, e2111628510, 2022.

SOUZA, G. C. D.; FRANCISCO, L. B. A.; MIRANDA, D. C. **A utilização de pneus na construção civil: um estudo de caso sobre a eficiência e viabilidade do método em Teófilo Otoni-MG**. [S.l.: s.n.], [s.d.].

VERDUM, R.; VIEIRA, C. L.; CANEPPELE, J. C. G. **Métodos e técnicas para o controle da erosão e conservação do solo**. Porto Alegre: UFRGS, 2016.