

Aplicação de Geossintéticos no Controle de Processos Erosivos: Estudo de Caso da Voçoroca na Avenida LO-29 Palmas-TO

Caio Cardoso Carneiro

Graduado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, caio.cardoso@mail.uft.edu.br

Marcus Vinícius Ribeiro e Souza

Professor Doutor, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, Brasil, marcussouza@uft.edu.br

Janaina Lima de Araújo

Professora Mestra, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, janaina.araujo@uft.edu.br

Bruno Rogério da Hora Lobo

Professor Doutor, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, Brasil, bruno.lobo@uft.edu.br

RESUMO: Este trabalho apresenta a aplicação de geossintéticos como alternativa técnica, econômica e ambientalmente viável para o controle de processos erosivos, com ênfase na voçoroca localizada na Avenida LO-29, em Palmas-TO. O estudo teve como objetivo propor uma solução sustentável para estabilização da área e contenção do carreamento de sedimentos. A metodologia envolveu a caracterização física e mecânica dos solos por meio de ensaios laboratoriais, a aplicação da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) para estimativa da perda anual de solo, e o uso do ensaio de Inderbitzen para determinação da taxa de erodibilidade dos perfis analisados. Complementarmente, foram realizadas análises de estabilidade dos taludes com o software SLOPE/W, além do dimensionamento de barreiras de contenção com geotêxteis não tecidos, considerando critérios de retenção, permeabilidade e permissividade hidráulica. Os resultados indicaram elevada suscetibilidade dos solos à erosão, perdas de solo superiores a 30 kg/m² por ano e fatores de segurança críticos, entre 1,06 e 1,14, nos taludes. As barreiras projetadas demonstraram boa eficiência hidráulica e elevada capacidade de retenção de sedimentos. Conclui-se que a utilização de geossintéticos é uma estratégia eficaz para o controle de erosão em áreas urbanas, com potencial de replicação em cenários similares.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Controle de erosão, Ensaio de Inderbitzen, Estabilidade de taludes, Engenharia geotécnica.

ABSTRACT: This study presents the application of geosynthetics as a technically, economically, and environmentally viable alternative for erosion control, with emphasis on a gully located at Avenida LO-29, in Palmas, Brazil. The objective was to propose a sustainable solution for area stabilization and sediment transport mitigation. The methodology included physical and mechanical characterization of soils through laboratory tests, application of the Universal Soil Loss Equation (USLE) to estimate annual soil loss, and the use of the Inderbitzen test to determine the erodibility rate of the analyzed profiles. In addition, slope stability analyses were performed using the SLOPE/W software, and sediment containment barriers were designed with non-woven geotextiles, considering criteria of retention, permeability, and hydraulic permissivity. The results indicated high susceptibility of the soils to erosion, with soil loss exceeding 30 kg/m² per year and critical safety factors ranging from 1.06 to 1.14 on the slopes. The designed barriers showed good hydraulic performance and high sediment retention capacity. It is concluded that the use of geosynthetics is an effective strategy for erosion control in urban areas, with strong potential for replication in similar scenarios.

KEYWORDS: Geosynthetics, Erosion control, Inderbitzen test, Slope stability, Geotechnical engineering.

1 INTRODUÇÃO

A erosão do solo é um problema ambiental de grande relevância, especialmente em regiões tropicais como o Brasil, onde a erosão hídrica é predominante e acarreta sérios prejuízos econômicos e ecológicos. Este

fenômeno, caracterizado pelo desprendimento e transporte de partículas de solo pela ação das chuvas, impacta negativamente áreas agrícolas e urbanas, provocando a perda de camadas superficiais férteis, a diminuição da produtividade agrícola, a poluição e o assoreamento de corpos d'água, e a destruição de infraestruturas como estradas e pontes (MORGAN, 2005).

Os processos erosivos são fenômenos naturais responsáveis pelo desenho do relevo e integram a dinâmica externa, que esculpe a superfície do planeta. Em condições naturais a evolução desses processos se dá de forma harmônica, influenciada por diversos fatores pedogênicos. No entanto, como colocado por Camapum et al. (2006), quando há um desequilíbrio devido à interferência do homem e não é permitida ao solo a recuperação natural, dá-se origem à erosão acelerada (ou antrópica).

A cidade de Palmas-TO apresenta diversos casos de erosões aceleradas, dentre as quais se destaca a voçoroca localizada na Avenida LO-29 (figura 1), que avança em direção ao lago de Palmas, com extensão de 1 km. Esse tipo de processo erosivo compromete o meio ambiente, a segurança da população e a infraestrutura urbana, tornando-se um desafio técnico e socioambiental para os gestores públicos.

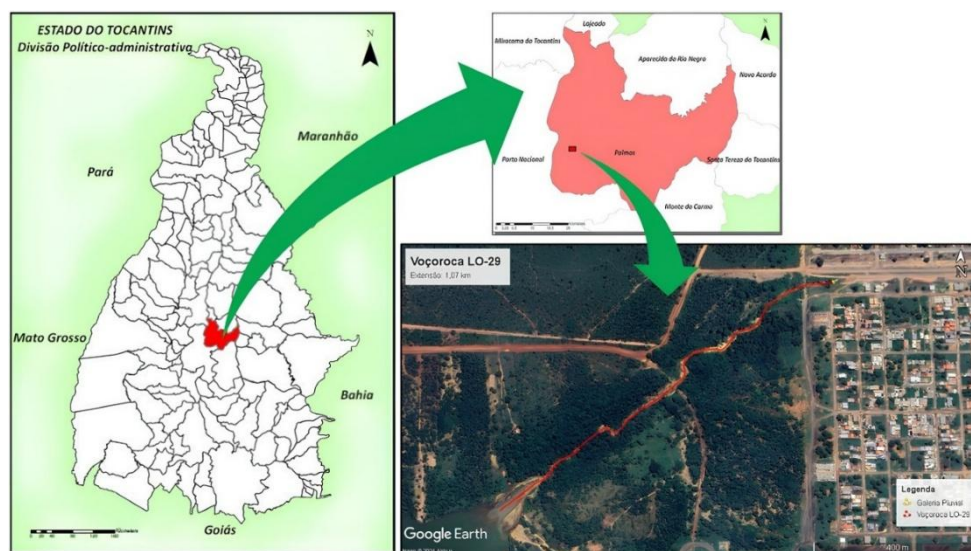


Figura 1. Voçoroca LO-29, Situação.

Para mitigar esses impactos, a engenharia geotécnica tem desenvolvido e aprimorado diversas técnicas de controle de erosão. Entre essas técnicas, a aplicação de geossintéticos tem se destacado pela sua eficiência e versatilidade. Geossintéticos são materiais poliméricos utilizados em contato com o solo e possuem múltiplas funções, como reforço, separação, drenagem e controle de erosão (KOERNER, 2012). Esses materiais, que incluem geotêxteis, geogrelhas, geocélulas, geomantas, geomembranas, entre outros, oferecem soluções economicamente viáveis e ambientalmente corretas, além de instalações mais rápidas em comparação com métodos tradicionais.

Ao passo em que a geotecnia evolui e as obras passam a requerer maiores níveis de controle de qualidade e segurança, a indústria de geossintéticos evolui no mesmo ritmo, tornando-se presente em diversos ramos da engenharia.

Neste contexto, este trabalho propõe desenvolver uma proposta de intervenção para controle do processo erosivo localizado na Avenida LO – 29 em Palmas Tocantins, por meio da aplicação de geossintéticos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os processos erosivos apresentam características distintas, determinadas pelo agente responsável por sua evolução. A erosão hídrica é um fenômeno natural intensificado pela ação antrópica, caracterizada pelo desprendimento e transporte de partículas do solo pela ação da água da chuva. As principais formas desta erosão são a laminar, a linear (sulcos, ravinas) e a erosão em voçorocas. Esta última representa o estágio mais avançado, exigindo soluções mais complexas e dispendiosas.

O desencadeamento da erosão é influenciado por dois elementos principais: A erosividade da água, que é o elemento ativo e a erodibilidade do solo, que é o elemento passivo. Além destes, existem também os fatores

modulares complementares, que desempenhando um papel significativo, podendo facilitar ou dificultar o processo erosivo.

As propriedades do solo, como sua granulometria e coesão, desempenham um papel crucial na progressão do processo erosivo; é notável que a matéria orgânica presente no solo e as partículas de argila são as primeiras frações a se desprenderem (MAGALHÃES, 2001). Para a avaliação da perda de solo, a adoção de metodologias que determinam a erodibilidade do solo e a erosividade da chuva são de extrema importância.

O ensaio de Inderbitzen ainda não é normatizado no Brasil, mas é amplamente aplicado em pesquisas, visando a obtenção da taxa de erodibilidade (K_i) em $\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$, parâmetro muito útil em análises relacionadas à perda de solo, e consiste na simulação de um escoamento superficial sobre um corpo de prova, em que a perda de solo é medida em intervalos de tempo pré-determinados. O equipamento é composto por uma rampa hidráulica com inclinação variável, com um porta amostra no centro ou no final da rampa, onde deve ser colocada uma amostra de solo que será submetida a um fluxo superficial (ABMS, 2023).

Bastos (1999) sugere que os solos mais suscetíveis aos processos erosivos apresentam valores de K_i superiores a $0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ e que os solos mais resistentes apresentem valores de K_i inferiores a $0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$.

Para a estimativa em termos médios da massa de solo perdida em uma área ao longo de um ano, faz-se uso da equação universal da perda de solo – USLE, representada a seguir na equação 1:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P_c \quad (1)$$

Onde:

A = perda de solo por unidade de área ao longo do ano ($t \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$). R = fator de erosividade da chuva ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), que pode ser calculado pelas equações 2 e 3 a seguir (LIMA, 2018):

$$R = \sum_{j=1}^{12} R_j \quad (2)$$

$$R_j = 67,355 \cdot \left(\frac{P_m^2}{P_a} \right)^{0,85} \quad (3)$$

Em que: R_j é a média mensal do índice de erosividade ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); P_m é a precipitação total mensal (mm); e P_a é a média anual da precipitação da série histórica (mm). K_{USLE} = fator de erodibilidade do solo ($t \cdot h \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$), que pode ser obtido a partir do modelo proposto por Wischmeier e Smith (1978 apud CHUQUIPIONDO, 2007) apresentado pela equação 4:

$$K = \frac{2,1 \cdot M^{1,4} \cdot 10^{-4} \cdot (12 - a) + 3,25 \cdot (b - 2) + 2,5 \cdot (c - 3)}{100} \quad (4)$$

Em que: M é um parâmetro que define o tamanho das partículas (%); a expressa o teor de matéria orgânica do solo (%); b define a classe de estrutura do solo; e c consiste na classe de permeabilidade do solo. $L \cdot S$ = fator topográfico combinado que expressa o comprimento e a declividade, calculado pela equação 5:

$$L \cdot S = 0,00984 \cdot L_R^{0,63} \cdot D_M^{1,18} \quad (5)$$

Em que: L_R é o comprimento da rampa (m) e D_M é a declividade média do trecho (%). C = fator que expressa o uso do solo (Runoff); P_c = fator que expressa a prática conservacionista do solo.

Outro mecanismo importante e que deve ser levado em consideração no estudo deste problema é a instabilidade de taludes e desmoronamento de maciços de solo. Segundo Machado e Machado (1997), os taludes de uma voçoroca são sujeitos a forças gravitacionais e de percolação de água, que tendem a desestabilizar a estrutura até que sua resistência não seja mais suficiente para conter essas ações, resultando na ruptura do maciço. Pode-se estabelecer uma relação estrita entre o transporte de partículas pela percolação da água, a formação de vazios dentro do solo, a instabilidade dos taludes e a geometria das erosões.

A utilização de geossintéticos em processos erosivos tem como objetivo reduzir o tempo de escoamento, minimizar a perda de solo, aumentar a retenção de sedimentos e promover a infiltração, diminuindo o

coeficiente de escoamento superficial. Além disso, as soluções com geossintéticos são mais econômicas em comparação com métodos tradicionais e podem melhorar a estética do ambiente. (MELO, 2020).

O uso de geotêxteis no controle de erosão envolve sua combinação com materiais granulares, seguindo critérios de drenos e filtros. A vantagem do geotêxtil é que ele elimina a necessidade de prever uma transição granulométrica entre esses materiais. Ao se seguir os critérios usuais de retenção, permeabilidade e colmatação, muitas obras de controle de erosão são dimensionadas adequadamente.

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi estruturada em três etapas principais: caracterização do solo, análise de estabilidade dos taludes laterais da erosão e dimensionamento de barreiras de contenção de sedimentos utilizando geossintéticos. Para a caracterização física e mecânica do solo na área de estudo, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas em três pontos representativos do solo da erosão, sendo eles o topo do talude (solo 01), o pé do talude (solo 02), e a base do canal (solo 03), conforme apresentado na figura 2, a seguir.



Figura 2. Pontos Representativos do Solo.

Foram realizados ensaios de granulometria, limites de Atterberg, umidade natural e densidade real dos grãos no laboratório de geotecnia da UFT e ensaio de cisalhamento direto rápido não adensado inundado, em um laboratório parceiro. Para avaliação da erodibilidade, foi confeccionado um aparelho de inderbitzen também no laboratório de geotecnia da UFT (figura 3).



Figura 3. Equipamento de Inderbitzen e Realização do ensaio.

O aparelho consiste em uma rampa hidráulica construída com uma chapa metálica, que possui um espaço reservado para a amostra de solo no centro (coletada com cap pvc 150mm), onde ao simular um escoamento é permitido designar uma inclinação para o equipamento (inclinando as tábuas de madeira), além de aferir a vazão e carga do fluxo de água aplicado durante o ensaio. O solo erodido é armazenado com o auxílio de peneiras e baldes para ter sua massa aferida após estufa.

Neste ensaio foram utilizadas amostras coletadas no pé do talude, considerando uma inclinação de 10%, por se aproximar da inclinação crítica de alguns trechos do terreno (9,8%), que foi verificada com o auxílio da ferramenta Google Earth. O ensaio ocorreu com a aplicação do fluxo de água e coleta do material erodido em baldes, nos tempos de 1 minuto, 5 minutos, 10 minutos e 20 minutos. Após cada coleta, o material foi lavado nas peneiras 10 (2,0 mm) e 200 (0,075 mm) e levado para a estufa por 24h.

Para a estimativa da perda de solo, adotou-se como referência os anos de 2018 (surgimento da erosão) a 2024 (ano desta pesquisa) para a utilização da Equação Universal da Perda de Solo (USLE), apresentada pela equação 1, onde todos os seus fatores foram calculados conforme as equações fornecidas no capítulo 2. Sendo R calculado pelas equações 2 e 3, com base nos dados pluviométricos de Palmas – TO dos anos de 2018 a 2024, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A seguir, a tabela 1 apresenta os valores das variáveis utilizadas na determinação da taxa de erodibilidade (K_i) e os coeficientes utilizados para a determinação do fator de erodibilidade (K_{USLE}).

Tabela 1. Parâmetros utilizados no cálculo da taxa e fator de erodibilidade

K_i				K_{USLE}			
Q (m ³ /s)	I (m/m)	τ_h (Pa)	A (cm ²)	M	a	b	c
$2,95 \cdot 10^{-5}$	0,1	0,12	176,71	1654,8	0	3	4

Após os ensaios de caracterização do solo, parte dos resultados obtidos foi utilizada para análise da estabilidade dos taludes da erosão, com o objetivo de avaliar os Fatores de Segurança (FS) dos mesmos perante as condições encontradas em campo. A análise foi realizada por meio da ferramenta SLOPE/W, que é parte do pacote GeoStudio 2024 versão estudante, produzido pela GEOSLOPE Internacional Ltd.

A figura 4 apresenta a localização dos seis taludes avaliados, com cerca de 10 metros de comprimento cada, suas alturas foram determinadas a partir da média das alturas de suas extremidades.



Figura 4. Localização dos Taludes.

Esta localidade foi escolhida para a análise dos taludes por apresentar maior acessibilidade para a realização das medidas das alturas com trena e também por suas características favoráveis à instabilidade (maiores alturas e inclinações próximas a 90°). Optou-se pela escolha do Método de Bishop, que se baseia na teoria do equilíbrio limite, para a análise.

Na sequência, propôs-se o uso de barreiras do tipo “silt fences” com geotêxteis não tecidos. O dimensionamento baseou-se nos critérios de retenção de partículas, permeabilidade e permissividade, conforme diretrizes técnicas da literatura e normas aplicáveis. A partir da análise granulométrica e demais ensaios de caracterização os seguintes procedimentos foram seguidos para a definição do geotêxtil: Obtenção dos diâmetros equivalente a 10% (D10), 60% (D60) e 85% (D85) passante; Determinação da porcentagem passante na peneira 0,075 mm; Com os valores de D85 para cada tipo de solo do local, foi selecionado o solo para a pior situação quanto ao critério de retenção (o solo que apresenta maior teor de finos).

A estimativa do volume de escoamento superficial foi feita a partir do método racional, onde a área de contribuição considerada para o cálculo do escoamento superficial foi definida com base na topografia observada no Google Earth ($Q = C \cdot i \cdot A$), utilizando $c = 0,5$; $i = 50$ mm/h; e $A = 2$ Km².

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, a figura 5 apresenta as curvas granulométricas dos solos estudados.

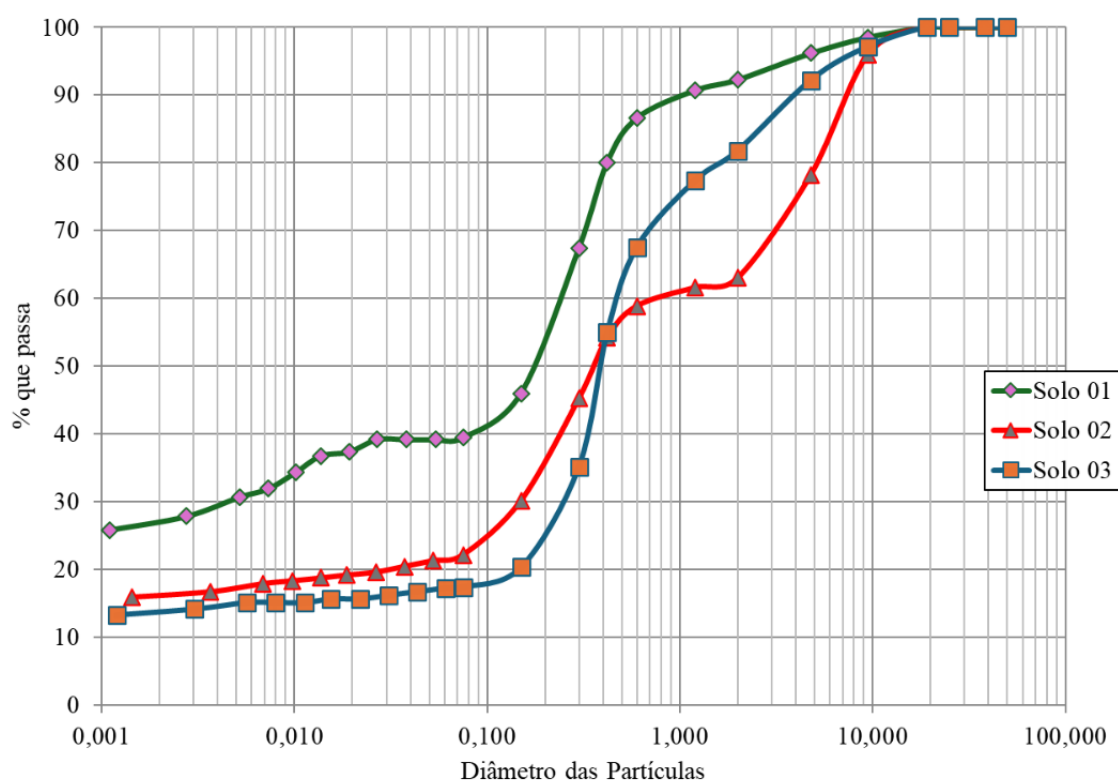


Figura 5. Curvas Granulométricas.

Segundo o sistema HRB /AASHTO, o solo 02 se classifica como A-2-6 e os solos 01 e 03 como A-2-4, ambos correspondendo a pedregulhos e areias siltosas ou argilosas. Essa classificação aponta a predominância de solos arenosos nas localidades da erosão, entretanto ambas as curvas granulométricas (figura 5) evidenciam um elevado teor de partículas finas (principalmente argilas), característica que é comum em solos tropicais, como os do cerrado brasileiro, e favorece a intensificação do processo erosivo.

Os solos analisados apresentaram predominância de frações finas, baixa permeabilidade e alta plasticidade, indicando alta suscetibilidade à erosão. O ensaio de Inderbitzen revelou taxa de erodibilidade na ordem de 0,142 g/cm²/min/Pa para o solo do pé do talude, caracterizando-o como altamente erodível ($K > 0,1$ g/cm²/min/Pa). Essas observações confirmam a necessidade da adoção de soluções que combinem capacidade de filtração e barramento do fluxo, como o uso de geotêxteis.

A aplicação da equação USLE apontou perdas de solo entre 30 e 65 kg/m² por ano (tabela 2), valores compatíveis com áreas de alta vulnerabilidade. Esses números corroboram os danos observados no campo, como o avanço da voçoroca em direção ao lago.

Tabela 2. Valores da Perda de Solo Anual da Erosão

Ano Base	Erosividade (R) $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$	Perda de Solo $t \cdot ha^{-1}$	Perda de Solo $Kg \cdot m^{-2}$
2018	11610,84	435,94	43,59
2019	7880,00	295,86	29,59
2020	9048,18	339,72	33,97
2021	17428,84	654,38	65,44
2022	12015,48	451,13	45,11
2023	8222,50	308,72	30,87
2024	11125,21	417,70	41,77

Esses resultados apontam que em 7 anos houve uma perda da ordem de $290,34 Kg \cdot m^2$. Além das características já citadas, essa magnitude também está associada aos valores do fator de erosividade da chuva, que se classificam como muito forte ($R > 1000$), e intensificam o desprendimento e o transporte de partículas superficiais.

As análises de estabilidade indicaram fatores de segurança entre 1,06 e 1,14, evidenciando a instabilidade da encosta (tabela 3).

Tabela 3. Fatores de Segurança dos Taludes

Talude	Extensão (m)	H ₁ (m)	H ₂ (m)	H _{Média} (m)	Fs
1	10,0	1,96	1,92	1,94	1,09
2	10,0	1,92	2,10	2,01	1,08
3	10,0	2,10	2,14	2,12	1,06
4	10,0	1,87	1,91	1,89	1,12
5	10,0	1,91	1,83	1,87	1,13
6	10,0	1,83	1,77	1,80	1,14

O possível rompimento destes taludes não representa um risco imediato ao meio ambiente ou à infraestrutura local, e nem oferece risco a vidas humanas, entretanto, a estabilização dos mesmos, deve diminuir a atuação de um dos principais mecanismos de evolução das voçorocas (desmoronamento) e impedir que a erosão alcance piores proporções.

Para a especificação das propriedades hidráulicas do geotêxtil (tabela 4), utilizou-se como referência o solo 1 (topo do talude), uma vez que este apresentou a maior fração de finos, pior situação para as barreiras.

Tabela 4. Propriedades do Geotêxtil

Propriedades do Geotêxtil	
Abertura	$O_{95} \leq 0,21 \text{ mm}$
Permeabilidade Normal ao Plano	$k_n \geq 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$
Permissividade	$\psi \geq 0,2 \text{ s}^{-1}$
Porosidade	$\eta_{GT} \geq 0,2 \text{ s}^{-1}$
Resistência à Tração	$R_T \geq 7 \text{ KN} \cdot \text{m}^{-1}$

A tabela 5 apresenta a simulação do comportamento do talude 3 em relação ao acúmulo de 1m de altura de solo sedimentado, variando o N.A. em 0,5 m.

É perceptível um aumento no fator de segurança do talude, tornando-o mais estável, devido a camada de solo sedimentado acrescentada, confirmando que a instalação das barreiras de contenção de sedimentos é eficaz no controle de processos erosivos não apenas por reter o solo transportado pela água da chuva, mas também por diminuir a possibilidade de deslizamentos.

Tabela 5. Simulação da Altura de Sedimentos Talude 3

Caso	Altura (m)			FS
	Talude	Solo Sedimentado	N.A.	
1	2,12	0	0	1,06
2	2,12	0	0,5	1,05
3	2,12	1	0	2,32
4	2,12	1	1,5	2,20

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A voçoroca da Avenida LO-29, em Palmas-TO, representa um grave problema ambiental e urbano. A metodologia adotada permitiu a caracterização do solo, a quantificação das perdas e a identificação das principais causas de instabilidade. O uso combinado de técnicas laboratoriais e modelagens computacionais forneceu bases técnicas sólidas para o diagnóstico e a proposta de intervenção.

Espera-se que o dimensionamento das barreiras com geotêxteis produza efeitos combinados que contribuam significativamente para o controle da erosão. Entre eles, destacam-se: a filtração das partículas finas seguida de sua decantação, a redução da energia do escoamento superficial ao reter temporariamente a água a montante, o estímulo à infiltração no solo pela retenção da lâmina d'água, e a diminuição da sucção matricial do solo devido ao aumento da saturação, o que contribui para reduzir o pico de erodibilidade nas áreas mais distantes da voçoroca. Além disso, o acúmulo de sedimentos a jusante das barreiras exerce um efeito mecânico estabilizador, reforçando os taludes naturais e dificultando a progressão da erosão.

As barreiras com geotêxteis mostraram-se eficazes no controle de sedimentos e representam uma solução técnica, econômica e ambientalmente viável. A replicabilidade da solução e sua adequação ao contexto local a tornam recomendável para aplicação em áreas urbanas suscetíveis a processos erosivos. Este trabalho reforça o papel da engenharia geotécnica na mitigação de impactos e na promoção da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABMS (2023). *Solos não saturados no contexto geotécnico*. – 2. ed. – São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- Bastos, C. A. B. (1999). *Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados*. Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Camapum, J. C. (2006). *Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro*. Brasília: Universidade de Brasília, FINATEC.
- Chuquipiondo, I. G. V. (2007). *Avaliação da estimativa do potencial de erodibilidade de solos nas margens de cursos de água: estudo de caso trecho de vazão reduzida Capim Branco I Araguari Minas Gerais*, UFMG, Belo Horizonte.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics*. 6th Edition. Xlibris Corporation.
- Lima, M. S. (2018). *Aplicação da equação universal de perda de solos (USLE) em estrada vicinal no município de Aquiraz-Ce*.
- Machado, S. L. (1997). *Mecânica dos solos II: Conceitos introdutórios*. Salvador.
- Magalhães, R. A. (2001). *Erosão: Definições, Tipos e Formas de Controle*. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, ABGE, Goiânia, GO, 11P.
- Melo, M. T. S. (2020). *Utilização de geossintéticos para controle de erosão superficial hídrica em face de talude*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-161/20, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 152 p.
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation*. 3rd Edition. Blackwell Publishing.