

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/173

Análises e Critérios de Dimensionamento para Estabilidade Superficial de Taludes com o uso de Geocélulas

Bruna Todescan

Engenheira Civil, PUC Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, Brasil, brutodescan@hotmail.com

Letícia Toniato Andrade

Engenheira Civil, USF Campinas, Campinas-SP, Brasil, leticiatoniato@outlook.com

Wladimir Caressato Junior

Engenheiro Civil, UNICAMP, Campinas-SP, Brasil, wladimircadressato@hotmail.com

RESUMO: Projetos de engenharia, tanto no setor mineiro quanto na infraestrutura, muitas vezes, promovem o aumento de erosões a partir de obras onde se retira cobertura vegetal, deixando o solo exposto a agentes erosivos, pelo impacto pluvial, aumentando o risco de assoreamento e possível contaminação por elementos tóxicos. A situação é agravada, quando se tem inclinações de taludes severas, superiores a 45 graus, onde as soluções convencionais acabam tornando-se técnica e economicamente inviáveis. Nesse contexto, os geossintéticos, em especial as geocélulas, tornam-se uma alternativa efetiva, uma vez que sua estrutura tridimensional permite o confinamento e manutenção de solo sob condições adversas. As geocélulas, quando combinadas a um substrato com propriedades orgânicas favoráveis, criam um ambiente adepto ao crescimento vegetativo, principalmente em meios onde se tem um ambiente quimicamente alterado e/ou substrato infértil. Além disso, pela presença de perfurações e textura em suas paredes, as geocélulas proporcionam drenagem livre, evitando a saturação do solo de preenchimento. Como resultado, tem-se garantida a estabilidade física e biológica, possibilitando o estabelecimento vegetativo e, conseqüentemente, o controle de erosão superficial em situações com inclinações acentuadas. Esse fator será evidenciado através de cálculos, onde se demonstrará a influência das geocélulas preenchidas com solo, sob elevadas declividades, tendo-se exemplos práticos realizados e finalizados na América Latina.

PALAVRAS-CHAVE: estabilidade superficial, taludes, controle de erosão, solo, raízes, geocélulas.

ABSTRACT: Engineering projects, both in the mining sector and in infrastructure, often promote an increase in erosion from works where vegetation cover is removed, leaving the soil exposed to erosive agents, due to the impact of rain, increasing the risk of silting and possible contamination by toxic elements. The situation is aggravated when there are severe slopes, greater than 45 degrees, where conventional solutions end up becoming technically and economically unfeasible. In this context, geosynthetics, especially geocells, become an effective alternative, since their three-dimensional structure allows the confinement and maintenance of soil under adverse conditions. Geocells, when combined with a substrate with favorable organic properties, create an environment suitable for vegetative growth, especially in environments where there is a chemically altered environment and/or infertile substrate. Furthermore, due to the presence of perforations and texture in their walls, geocells provide free drainage, preventing saturation of the filling soil. This factor will be highlighted through calculations, which will demonstrate the influence of geocells filled with soil, under high slopes, with practical examples carried out and completed in Latin America.

KEYWORDS surface stability, slopes, erosion control, soil, roots, geocells.

1 INTRODUÇÃO

Em sua totalidade, seja em mineradoras, aterros sanitários, infraestrutura viária, ferroviária ou projetos urbanos, proteção de taludes em superfícies suscetíveis a processos erosivos são tipicamente revestidos com técnicas de uso de biomantas ou geomantas. Nesse cenário as dificuldades surgem quando se tem superfícies inférteis, como é o caso em meios quimicamente alterados ou onde a geologia predominante são rochas, solos friáveis, ou inclinações de taludes elevadas. Ou ainda, ambos os casos.

Processos erosivos em taludes são o resultado do desgaste e/ou arraste das partículas do solo pela ação de agentes naturais, como água de precipitação (erosão hídrica), vento (erosão eólica), gelo (devido às mudanças de temperatura) ou outros fatores geológicos, incluindo ainda o arraste gravitacional.

A função da engenharia atual é buscar alternativas que permitam, de forma segura e responsável, combinar, ou até substituir, soluções convencionais, visando proporcionar vantagens técnicas e econômicas.

É nesse contexto que os geossintéticos, especificamente as geocélulas, se tornam uma alternativa altamente interessante para projetos de controle de erosão superficial, que permitem o estabelecimento de um revestimento físico e biologicamente estável.

O presente estudo estará focado em demonstrar os problemas relacionados a erosões do tipo hídrica, que ocorrem através do destacamento das partículas do solo pela ação da precipitação e do escoamento, bem como pelo transporte dessas partículas para jusante, onde se depositam, podendo ser subsequentemente transportadas.

2 EROSÕES EM TALUDES INCLINADOS

Quando umedecidos, solos tendem a sofrer uma diminuição em sua coesão. A perda de coesão ocorre devido à ação da água em desagregar e separar as partículas do mesmo, como esquematizado na Figura 1(a). Quando a água da chuva ou o escoamento superficial atravessa o solo, ela exerce forças que quebram suas ligações entre as partículas, especialmente em solos onde a coesão é menor.

Conforme as partículas são desagregadas e se tornam mais soltas, ficam mais suscetíveis ao arraste pela água, resultando nos processos erosivos, como na Figura 1(b). Portanto, a perda de coesão é um aspecto fundamental da erosão hídrica, pois enfraquece a estrutura do solo e facilita a remoção das partículas pelo fluxo de água.



Figura 1. (a) Representação de erosão hídrica (b) Erosão superficial em talude.

2.1. Soluções Convencionais para o Controle de Erosão Superficial

Para lidar com as questões de erosão do solo, uma variedade de soluções tem sido utilizada ao longo dos anos, sendo as mais típicas as geomantas e biomantas.

As geomantas são estruturas feitas de materiais sintéticos, como polipropileno ou poliéster, entrelaçados para formar uma malha resistente. Essas estruturas são instaladas sobre o solo exposto e tipicamente fixadas com estacas ou grampos, conforme Figura 2(a).

Já as biomantas, demonstradas na Figura 2(b), oferecem uma abordagem mais sustentável para o controle de erosão. Feitas de materiais biodegradáveis e orgânicos, como juta, coco ou palha e, assim como as geomantas, são instaladas sobre o solo exposto. À medida que se degradam, as biomantas contribuem para o enriquecimento do solo com matéria orgânica, melhorando sua qualidade e fertilidade.

Ambas representam soluções eficazes para o controle de erosão em uma variedade de ambientes, tanto em áreas urbanas quanto encostas naturais, desde que não sejam aplicadas em taludes com inclinações acentuadas. Em taludes com declividades elevadas, a capacidade das geomantas e biomantas em reter o solo pode ser insuficiente para evitar a erosão causada pelas forças gravitacionais e hidráulicas intensas. Além disso, a maior dificuldade para fixação nesses taludes com inclinações acentuadas resulta em elevados custos, podendo comprometer sua aplicação.

Tendo isso em vista, as geocélulas de PEAD perfuradas e texturizadas, Figura 2(c), se tornam uma solução altamente eficiente para o controle da erosão hídrica, em cenários com altas inclinações. Ao serem preenchidas com solo, as geocélulas criam uma superfície irregular e permeável, que retarda o fluxo de água da chuva sobre o solo exposto, diminuindo a erosão causada pelo escoamento superficial.

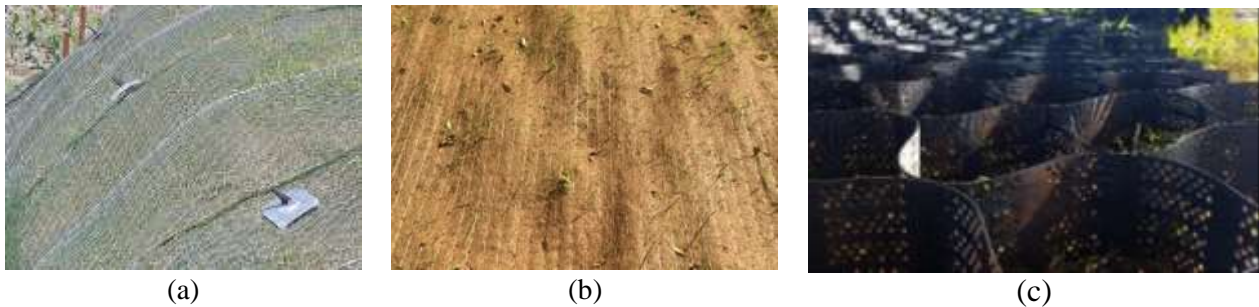


Figura 2. Soluções para controle de erosão: (a) geomanta (b) biomanta (c) geocélulas.

3 ATUAÇÃO DAS GEOCÉLULAS EM UM CONTROLE DE EROSIÃO

Para o controle de erosões superficiais, as geocélulas de PEAD perfuradas e texturizadas (Figura 3) atuam confinando o material de preenchimento (substrato), mantendo-o a curto e longo prazo. A curto prazo, de modo que o solo de boa qualidade se mantenha superficialmente estável para a proliferação de vegetação, e a longo prazo, visando atender a vida útil e expectativas do projeto.

Nesse contexto, as geocélulas para um controle de erosão, melhoram o desempenho dos taludes vegetados nos seguintes aspectos:

- Proporcionam um ambiente biologicamente favorável para o estabelecimento de vegetação, o que se pode garantir através das perfurações e textura presentes nas paredes das células;
- Reforçam as raízes vegetativas, uma vez que as mesmas se estendem através da abertura da célula, ancorando o solo e elevando a resistência à erosão;
- Direcionam o fluxo hidráulico, através das perfurações nas paredes das células, permitindo a drenagem paralela ao talude;
- Atuam como barreira física, reduzindo a velocidade de fluxo e conseqüente formação de sulcos e ravinas, uma vez que suas paredes funcionam como uma seqüência de obstáculos.



Figura 3. (a) e (b) Influência das geocélulas perfuradas e texturizadas às raízes vegetativas.

4 CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DO MODELO DE GEOCÉLULA

Um projeto de sistema de confinamento celular para proteção e controle de erosão em taludes requer análises locais, considerando: geometrias dos taludes (altura e inclinação), parâmetros geotécnicos da fundação e do solo de preenchimento das células.

Quando aplicadas sob inclinações, pode-se esperar que as células se “esvaziem” parcialmente quando o solo de preenchimento se consolida em forma natural. Usualmente, para inclinações de talude de até 45°, utiliza-se altura de geocélula de 75 mm. Para inclinações acentuadas, são utilizadas maiores espessuras de célula, onde sua geometria é verificada de modo a manter minimamente 50% da espessura (altura) da célula coberta pelo preenchimento, conforme Figura 4, podendo essa condição ser alterada em função ao comprimento de raiz do tipo de vegetação escolhida, condições geológicas da fundação, erosividade do solo, entre outros fatores.

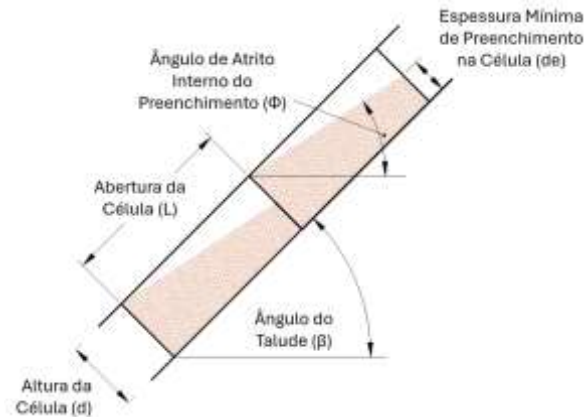


Figura 4. Parâmetros considerados para dimensionamento de geocélulas preenchidas com solo sob inclinação. (Fonte: elaborada pelo autor).

Com isso, a relação entre as variáveis geométricas é expressa por:

$$de = d - L \tan(\beta - \phi) \quad (1)$$

Onde,

- d Espessura (altura) da célula;
- L Largura de abertura da célula;
- β Ângulo de inclinação do talude a ser revestido;
- ϕ Ângulo de atrito interno do solo de preenchimento das geocélulas.

4.1 Incremento das Raízes à Resistência ao Cisalhamento

O impacto das raízes na estabilidade superficial de taludes tem sido objeto de estudo no âmbito acadêmico por vários anos. Na década de 70, Gray (1974), identificou o aumento da resistência do solo com a presença de raízes em comparação com solos desprovidos delas. Resumidamente, observou-se que o aumento da coesão aparente do solo, pela presença de raízes, pode incrementar sua resistência ao cisalhamento de 3 a 4 vezes, como demonstrado na Figura 5.



Figura 5. (a) Comprimento de raiz (b) Demonstração do ganho de resistência ao solo.

Esse conceito também é demonstrado por Greenway (1989), o qual indica a distorção de uma raiz em uma zona de cisalhamento, conforme Figura 6. A tensão de tração da raiz e a componente na direção cisalhante são os esforços resistente à distorção.

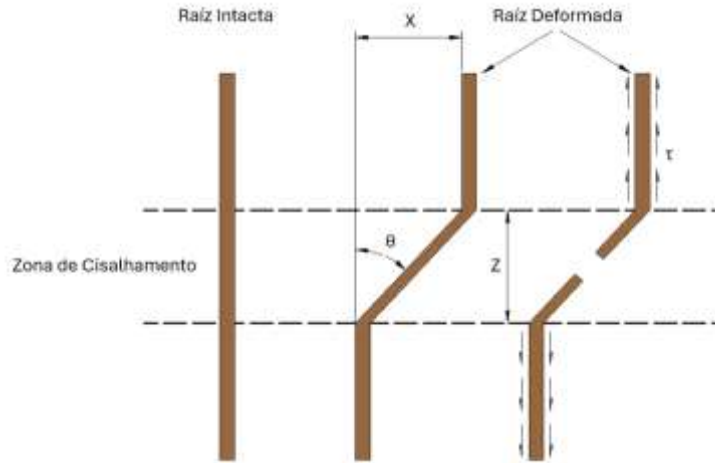


Figura 6. Modelo de comportamento de raiz. (Fonte: Greenway, 1989).

Isso resulta na variação geométrica dada por:

$$\Delta S = t_R (\text{sen}\theta + \text{cos}\theta \tan\emptyset) \quad (2)$$

Onde,

- t_R É a média da resistência à tração das raízes vegetativas por unidade de área de solo;
- θ É o ângulo de distorção na zona cisalhante;
- \emptyset É o ângulo de atrito interno do solo de preenchimento das geocélulas.

O valor da média da resistência à tração das raízes por unidade de área (t_R) pode ser estimada pela resistência à tração média das raízes (T_R) em função a razão da seção transversal do solo ocupada por elas, sendo:

$$t_R = T_R \left(\frac{A_R}{A} \right) \quad (3)$$

Onde,

- A_R É a área da seção transversal das raízes em uma seção transversal de solo;
- A É a área da seção transversal de solo estudada.

A resistência à tração de espécies vegetativas é tema de estudo há várias décadas. Como referência, tem-se a Tabela 1, que demonstra a resistência à tração de diversas espécies vegetativas.

Tabela 1. Resistência à tração de raízes em função à espécie. (Fonte: Hengchaovamich, 1998).

Espécie de Planta	Resistência à Tração (MPa)
Gramma Bermuda	13,45 ± 2,18
Gramma Pensacola	17,55 ± 2,85
Gramma Bahia	19,23 ± 3,59
Gramma Dalls	19,74 ± 3,00
Late Juncellus	24,50 ± 4,20
White Clover	24,64 ± 3,36
Gramma Batatais	27,30 ± 1,74
Gramma Vetiver	85,10 ± 31,20

Logo, o aumento da resistência ao cisalhamento do solo pela presença de raízes, tomando-se como referência a equação 2, pode ser expresso por:

$$\begin{aligned} \tau_f &= \tau_i + \Delta S \\ \sigma_N \tan \phi_f &= \sigma_N \tan \phi_i + \Delta S \\ \phi_f &= \left(\frac{\sigma_N \cdot \tan \phi_i + \Delta S}{\sigma_N} \right)^{\tan^{-1}} \end{aligned} \quad (4)$$

Além disso, os cálculos apresentados por Manbeian (1973) e citados por Gray (1974), demonstram que a resistência ao cisalhamento devido às raízes estaria entre 3,9 e 5,0 kN/m², a partir de ensaios de cisalhamento direto realizados em solos sem raízes e solos com raízes de diversas culturas de plantas herbáceas. O método demonstrado por Waldron e Darkessian (1981) resulta que é possível obter resistência ao cisalhamento, para casos de desenvolvimento maduro e vigoroso, de 3,0 e 5,0 kN/m², para vegetação tipo pasto e arbustiva, respectivamente. Já Hengchaovamich (1998) apresenta que a resistência ao cisalhamento de raízes da planta tipo vetiver pode proporcionar um ganho de 6,0 a 10,0 kN/m² por quilo de raiz por metro cúbico de solo.

5 APLICAÇÃO DE CONCEITOS

Para um caso típico de controle de erosão, tomando-se como base um talude com inclinação de 50°, onde se espera depositar um solo com ângulo de atrito interno (ϕ_i) de 29,0° e peso volumétrico de 16,0 kN/m³, são demonstradas duas condições, conforme Tabela 2, sendo: uso de geocélulas preenchidas apenas com solo e uso de geocélulas preenchidas com solo considerando o incremento (ΔS) de 3 kN/m² proporcionado por raízes vegetativas.

Tabela 2. Influência do aporte da resistência ao cisalhamento do solo para determinação do modelo de geocélula.

ϕ_i (°)	ΔS (kN/m ²)	ϕ_f (°)	Abertura da Geocélula	Altura da Geocélula
29,0	-	29,0	292 x 251 mm	200 mm
29,0	3,0	56,0	416 x 374 mm	100 mm

Além disso, aplicando-se o conceito demonstrando, é possível determinar a altura mínima de célula variando a inclinação dos taludes e ângulos de atrito interno. A Figura 7 considera geocélulas com abertura típica de 416 x 374 mm, utilizando como preenchimento solos com e sem o incremento ($\Delta S = 3$ kN/m²), para aplicação em projetos.

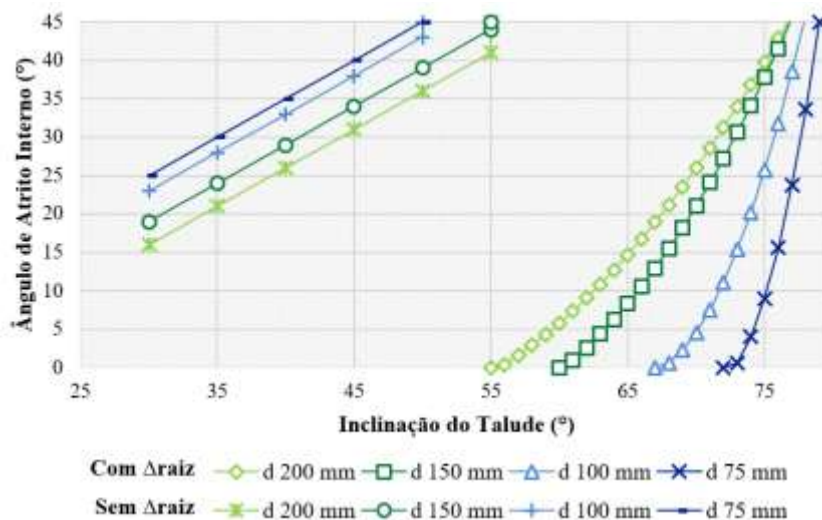


Figura 7. Seleção da altura de geocélula para diversas declividades e preenchimentos.

6 ESPECIFICAÇÕES DAS GEOCÉLULAS

Os estudos realizados pelo Instituto de Geossintéticos dos EUA desde a década de 80, possibilitaram o desenvolvimento de um modelo genérico para uso de geocélulas em obras civis, denominada Geocélula de Polietileno GS-15. A pesquisa fornece recomendações de propriedades e ensaios que auxiliam profissionais de engenharia na especificação de uma geocélula de PEAD, sendo: GRI-GS15 “*Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for Geocells Made From High Density Polyethylene (HDPE) Strips*”.

Adicionalmente, a ASTM D8269 “*Standard Guide for the Use of Geocells in Geotechnical and Roadway Projects*”, considera o demonstrado pelo GRI-GS15 como método preferível para MQA e MQC para geocélulas de PEAD.

6.1. Acessórios de Instalação das Geocélulas

Para aplicação de geocélulas em controle de erosão, tipicamente são trabalhadas três principais técnicas de ancoragem, sendo elas: estacas de aço, tendões ou tensores multidirecionais, combinados aos fixadores para uniões, conforme Figura 8.

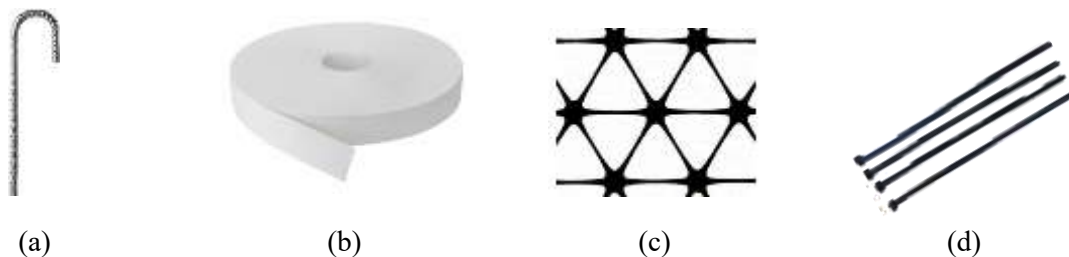


Figura 8. Acessórios para geocélulas: (a) Estaca de aço (b) Tendão (c) Tensor multidirecional (d) Fixadores para uniões.

7 EXPERIÊNCIAS DE GEOCÉLULAS APLICADAS PARA O CONTROLE DE EROSÃO

Atualmente, já existem diversos projetos com o uso de geocélulas perfuradas e texturizadas para o controle de erosão em taludes, tanto no Brasil quanto em outros países da América Latina. Exemplificando, a Figura 9 mostra uma experiência realizada no Brasil, na cidade de Poços de Caldas, em Minas Gerais.

O projeto contemplava taludes com altura de 9,0 metros, com inclinações de até 70°. A solução trabalhada considerou o uso de geocélulas de PEAD, perfuradas e texturizadas, com geometrias de altura de 100 mm e abertura de 416 x 374 mm, preenchidas com uma mistura de solo orgânico e sementes vegetativas, combinadas ao sistema de ancoragem através do uso de tensores multidirecionais, com resistência de 90 kN/m, e fixadores para uniões entre ambos.

O resultado permitiu o desenvolvimento da vegetação sob elevadas inclinações em curto prazo e a efetividade do revestimento a longo prazo.



Figura 9. (a) Execução de preenchimento de geocélulas de PEAD (b) Vegetação estabelecida após um mês.

8 CONCLUSÃO

Tratando-se de um projeto de controle de erosão superficial, são encontradas dificuldades como: superfícies inférteis em meios quimicamente alterados, ou onde a geologia predominante são rochas, solos friáveis, ou inclinações de taludes severas.

Uma solução para esse cenário é o sistema de confinamento com geocélulas perfuradas e texturizadas, combinado a um solo de preenchimento com propriedades orgânicas favoráveis, o qual proporciona um ambiente físico e biologicamente adequado para a estabilização desse solo e proliferação de vegetação. Como consequência, tem-se o controle de erosão superficial.

Assim, as geocélulas garantem estabilidade a curto prazo, de modo a manter o solo confinado estável até que a vegetação se estabeleça. E a longo prazo, quando se tem o ganho de resistência ao cisalhamento no sistema geocélulas mais solo, proporcionado pelas raízes vegetativas.

Através do uso de geocélulas de PEAD perfuradas e texturizadas, preenchidas com solo para o controle de erosão superficial, após o incremento proporcionado pelas raízes, são geradas vantagens significativas, onde é possível otimizar a geometria das células, aumentando sua abertura e diminuindo sua espessura, gerando a redução de custos de material para o projeto de até 64%.

Para garantir a eficácia do revestimento, se fazem necessárias características como perfurações e texturas, dadas no modelo estudado pelo Instituto de Geossintéticos, GRI-GS15, juntamente à ASTM D8269.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM International. ASTM D8269 (2021). *Standard Guide for the Use of Geocells in Geotechnical and Roadway Projects*.

Fierro, G. (2020). *Desing Methodoly for Mine Closure Covers*. 4th Pan American Conference on Geosynthetics, Rio de Janeiro, Brasil, 2020, p. 1-10.

Gray, D. H. (1970). *Effects of forest clear - cutting on the stability of natural slopes*. Bulletin of the Association of Engineering Geologists. Vol. 7, p. 45-66.

Gray D. H. (1974). *Reinforcement and stabilization of soil by vegetation*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Nova Iorque, EUA. Vol. 100, p. 695-699.

Hengchaovanich, D. (1998). *Vetiver grass for slope stabilization and erosion control*. Pacific Rim Vetiver Network, Tailândia, n. 2, p. 28.

Greenway, D. R. (1989). *Slope stability: geotechnical engineering and geomorphology*. Ed. Anderson, M.G., Richards, K.S. Chichester, Inglaterra. Cap. 6, p. 187-230.

GRI Standard GS-15 (2016). *Test Methods, Test Properties and Frequency for Geocells Made From High Density Polyethylene (HDPE) Strips*. Pensilvânia, EUA.

Lemes, M. R. T. (2001). *Revisão dos Efeitos da Vegetação em Taludes*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil-PPGEC / UFRGS. 130 p.

Manbeian, T. (1973). *The Influence of Soil Moisture Suction, Cyclic Wetting and Drying, and Plant Roots on Shear Strength of Cohesive Soil*. University of California. Berkeley, EUA.

Waldron, L.J e Suren, D. (1981). *Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties*. Soil Science. Vol. 132.