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/COBRAMSEG2026.4/19

Análise do Efeito de Raízes na Resistência ao Cisalhamento de Solos: Uma Revisão Crítica

Mirella G. A. Rodrigues
Mestranda, UFPE, Recife, Brasil, mirella.alcoforado@ufpe.br

Silvio R. De M. Ferreira
Professor, UFPE, Recife, Brasil, silvio.mferreira@ufpe.br

Leonardo J. Do N. Guimarães
Professor, UFPE, Recife, Brasil, leonardo.guimarães@ufpe.br

Selton de O. Lima
Mestrando, UFPE, Recife, Brasil, selton.lima@ufpe.br

Eduardo M. Do R. Barreto
Doutorando, UFPE, Recife, Brasil, eduardo.matthews@ufpe.br

Rayane G. P. Da Siva
Doutorando, UFPE, Recife, Brasil, rayane.gabriella@ufpe.br

João A. V. De Sousa
Doutorando, UFPE, Recife, Brasil, joaoarthur.sousa@ufpe.br

Vinicius C. B. De Lima
Mestrando, UFPE, Recife, Brasil, vinicius.cezar@ufpe.br

Wislayne S. Alves
Mestranda, UFPE, Recife, Brasil, wislayne.alves@ufpe.br

RESUMO: O presente trabalho apresenta uma análise dos efeitos causados pelas raízes vegetais na resistência ao cisalhamento dos solos, em especial destacando sua aplicação na estabilidade de taludes e no controle de processos erosivos. Conduziu-se a pesquisa partindo de uma revisão bibliográfica abrangente, ao levar em consideração estudos experimentais e teóricos que investigam o comportamento do compósito solo-raiz, assim como sua contribuição para parâmetros geotécnicos de resistência. Ressaltamos no texto como as raízes atuam como reforços naturais, proporcionando ancoragem, fricção e intertravamento entre partículas do solo, o que resulta em incremento da coesão aparente e, também, do ângulo de atrito interno. Os resultados compilados de autores diversos demonstraram que o aumento da resistência ao cisalhamento depende de fatores determinantes como: morfologia radicular, diâmetro, densidade, profundidade e tipo de solo. Ensaios de cisalhamento direto e triaxiais mostram incrementos importantes de coesão, enquanto o efeito no ângulo de atrito é baixo, em geral. Através desse artigo, demonstramos evidências que confirmam que a vegetação pode desempenhar papel determinante na estabilidade superficial e na mitigação de movimentos de massa. Para além do reforço mecânico, os estudos analisados também salientam a importância dos efeitos hidromecânicos acoplados, a exemplo do impacto da sucção matricial, evapotranspiração e alterações na estrutura porosa do solo. A presença da vegetação pode modificar as condições de umidade e a permeabilidade, o que provoca uma influência direta sob comportamento tensão– deformação e o equilíbrio de encostas sob variações climáticas. No artigo, reforçamos ainda o uso de modelos analíticos, como o de Wu-Waldron, e de abordagens numéricas baseadas no Método dos Elementos Finitos os quais vêm sendo empregados para quantificar o reforço proporcionado pelas raízes. Os resultados que consolidamos nesta revisão destacam o potencial da vegetação como técnica sustentável e viável do ponto de vista econômico para reforço e estabilização de taludes. Além disso, a integração de práticas advindas da bioengenharia de solos amplifica as possibilidades de soluções baseadas na natureza. O presente trabalho reforça, desta maneira, a importância de considerar o efeito das raízes nos modelos de resistência e nos critérios de projeto de obras de contenção e encostas vegetadas.

PALAVRAS-CHAVE: Resistência ao cisalhamento, Interação solo-raiz, Bioengenharia, Estabilidade de taludes, Coesão.

ABSTRACT: This paper presents an analysis of the effects of plant roots on the shear strength of soils, with particular emphasis on their application to slope stability and erosion control. The research was conducted based on a comprehensive literature review that considered experimental and theoretical studies investigating the behavior of the soil–root composite as well as its contribution to geotechnical strength parameters. We highlight how roots act as natural reinforcements, providing anchorage, friction, and interlocking between soil particles, which leads to increases in apparent cohesion and, to a lesser extent, the internal friction angle. Compiled results from various authors show that the increase in shear strength depends on key factors such as root morphology, diameter, density, depth, and soil type. Direct shear and triaxial tests indicate significant cohesion gains, while the effect on the friction angle is generally small. Through this article we present evidence confirming that vegetation can play a decisive role in superficial stability and the mitigation of mass movements. Beyond mechanical reinforcement, the analyzed studies also emphasize the importance of coupled hydromechanical effects, such as matric suction, evapotranspiration, and changes in soil pore structure. Vegetation can modify moisture conditions and permeability, directly influencing stress–strain behavior and slope equilibrium under climatic variations. We also underscore the use of analytical models, such as the Wu–Waldron model, and numerical approaches based on the finite element method, which have been employed to quantify root reinforcement. The results consolidated in this review highlight the potential of vegetation as a sustainable and economically viable technique for slope reinforcement and stabilization. Moreover, integrating soil bioengineering practices expands the possibilities for nature-based solutions. This paper therefore reinforces the importance of considering root effects in strength models and in the design criteria for retaining structures and vegetated slopes.

KEYWORDS: Shear strength; Soil–root interaction; Soil bioengineering; Slope stability; Cohesion.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Relevância

A estabilidade de taludes e o controle de processos erosivos representam desafios críticos e sempre atuais na engenharia geotécnica moderna. Recentemente, a bioengenharia de solos vem ganhando destaque como uma metodologia eficaz, sustentável e, também de baixo custo, ao fazer uma integração entre elementos vivos (vegetação) a sistemas de engenharia tradicionais. As raízes das plantas atuam como reforços naturais, inserindo-se na matriz do solo e modificando suas propriedades mecânicas e hidrológicas.
Estudos demonstram que as raízes podem aumentar significativamente a resistência ao cisalhamento do solo. Esse reforço ocorre principalmente através de mecanismos físicos, em que as raízes funcionam como fibras sob tração, e mecanismos biológicos associados à evapotranspiração. A abordagem não apenas melhora a estabilidade geotécnica, mas também promove benefícios ambientais, como a redução da erosão superficial e o aumento da biodiversidade.
O cenário de mudanças climáticas, caracterizado por períodos prolongados de seca intercalados com chuvas intensas, torna a vulnerabilidade dos solos ainda mais exarcebada, especialmente os solos argilosos. Ciclos frequentes de secagem e umedecimento alteram as propriedades hidromecânicas, impactando o comportamento de taludes e aterros. Tais instabilidades podem resultar em prejuízos econômicos severos e perda de vidas humanas, evidenciando a necessidade urgente de medidas preventivas robustas.

1.2 Mecanismos de Interação Solo-Raiz

Como ponto de partida, consideramos que as raízes contribuem para o aumento da resistência ao cisalhamento devido à sua elevada resistência à tração. Na literatura geotécnica, esse incremento é interpretado com frequência como um aumento da coesão aparente do solo, visto que o impacto das raízes no ângulo de atrito

interno tende a ser mínimo. Por outro lado, a estimativa dessa coesão pode ser imprecisa se as não-linearidades da envoltória de ruptura e os mecanismos de falha progressiva não forem considerados.
Além do reforço mecânico, as raízes influenciam as propriedades hidráulicas, como por exemplo a permeabilidade e curvas de retenção de água. O crescimento das raízes pode alterar a estrutura porosa, criando fissuras que, em contrapardida, podem até mesmo diminuir a capacidade de retenção de água e aumentar a permeabilidade. A quantificação precisa desses efeitos acoplados (sucção e presença de plantas) representa um desafio significativo para o projeto geotécnico.

1.3 Objetivos

O presente artigo visa analisar, comparar e sintetizar o impacto do sistema radicular na resistência ao cisalhamento de diferentes tipos de solos. Especificamente, buscou-se: (i) revisar metodologias experimentais utilizadas para determinar a resistência de solos com raízes; (ii) comparar resultados quantitativos sobre o aumento da coesão e ângulo de atrito; (iii) discutir a influência da morfologia radicular (diâmetro, densidade, orientação); e, por fim, (iv) analisar os modelos analíticos existentes e suas limitações .

2 METODOLOGIA

Este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica crítica, baseada em uma seleção de estudos experimentais e teóricos com relevância sobre a influência de raízes vegetais na resistência ao cisalhamento dos solos. A busca foi realizada em bases de dados como Science Direct, Web of Science, Scopus e Google Scholar, utilizando termos como "resistência ao cisalhamento", "solos", "raízes vegetais" e "estabilidade".
Foram selecionados artigos que abordam a temática de forma abrangente, com ênfase em resultados experimentais recentes e metodologias de ensaio diversificadas. A análise incluiu a avaliação das metodologias (cisalhamento direto, triaxial, ensaios de tração), a apresentação dos resultados quantitativos e as implicações práticas para a engenharia civil.

3 METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS DE AVALIAÇÃO

A quantificação do efeito das raízes exige metodologias experimentais que capturem a complexa interação entre o sistema radicular e a matriz do solo.

3.1 Ensaios de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto é uma das abordagens mais comuns devido à sua simplicidade e custo reduzido. Maffra et al. (2019) realizaram ensaios em amostras indeformadas de solo arenoso e argiloso, coletadas in situ com cilindros metálicos, aplicando tensões normais de 100, 200 e 300 kPa . Embora prático, este ensaio possui limitações, como o controle restrito da drenagem e a pré-determinação da superfície de ruptura, que pode não coincidir com o plano mais fraco do compósito solo-raiz .

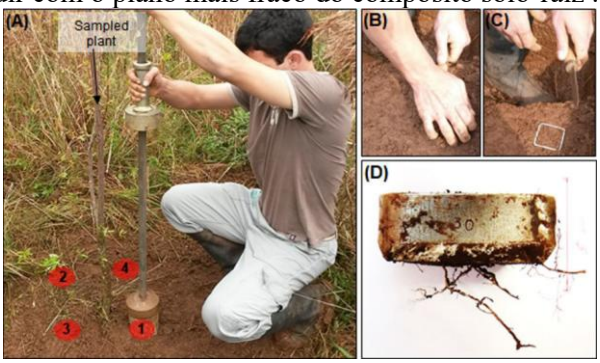


Figura 1. Coleta de amostras inalteradas com e sem raízes para ensaios de cisalhamento direto. (A) Amostrador de percussão; (B) e (C) Coleta de amostras sem raízes; (D) Exemplo de uma amostra com raízes. Fonte: Maffra et al. (2019) .

Variações em grande escala também são utilizadas para capturar a heterogeneidade do sistema radicular. Castegnaro (2012) descreve ensaios *in situ* em blocos de 50x50 cm com 25 cm de profundidade em solos com vetiver, observando aumentos de resistência de até 90,2% a 0,25 m de profundidade.

3.2 Ensaios Triaxiais

Os ensaios triaxiais representam uma metodologia mais sofisticada, permitindo que a falha ocorra no plano mais fraco da amostra e possibilitando o controle das condições de drenagem. Meng et al. (2020) empregaram ensaios triaxiais consolidados-não drenados (CU) para investigar a influência da geometria e distribuição das raízes em solos argilosos siltosos. Li et al. (2022) também utilizaram ensaios triaxiais CU para estudar os efeitos dos ângulos de distribuição das raízes e seus diâmetros.

3.3 Ensaios de Tração em Raízes

Para alimentar modelos analíticos, é crucial determinar a resistência individual das raízes. Ensaios de tração em feixes ou raízes individuais medem a força necessária para ruptura. Castegnaro (2012) obteve resistência média à tração de 38 kg/cm² para feixes de vetiver, valor inferior a pesquisas internacionais, possivelmente devido à umidade das amostras. Rodriguez (2019) desenvolveu um equipamento específico para avaliar a resistência à tração do solo sob diferentes estados hidráulicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise comparativa dos estudos selecionados revela padrões consistentes sobre como as raízes alteram os parâmetros de resistência e deformabilidade do solo.

4.1 Efeitos na Coesão Aparente (*c'*)

A coesão aparente é consistentemente apontada como o parâmetro mais beneficiado pela presença de raízes. Maffra et al. (2019) observaram que, em solo arenoso, a coesão média saltou de 6,4 kPa (solo sem raízes) para 21,4 kPa (com raízes), representando um aumento de 234% . Em solos argilosos, o incremento foi de 32% (de 7,2 kPa para 9,6 kPa). Esses dados sugerem que o efeito de reforço é proporcionalmente mais expressivo em solos granulares com baixa coesão natural. A Figura 2 ilustra as envoltórias de ruptura, demonstrando claramente o deslocamento vertical da reta de resistência (aumento de coesão) provocado pelas raízes.

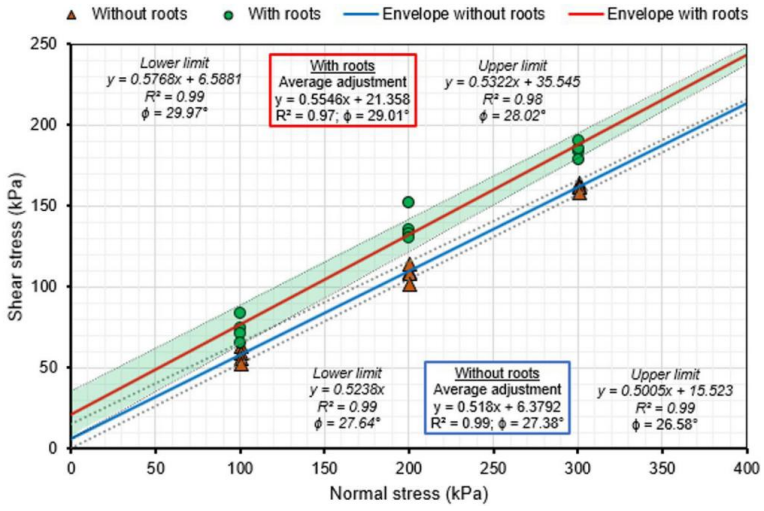


Figura 2. Envoltórias de falha de solo arenoso com e sem raízes. A área sombreada (solo com raízes) e as linhas pontilhadas (solo sem raízes) representam os intervalos de confiança com 95% de confiabilidade.
Fonte: Maffra et al. (2019).

Meng et al. (2020) corroboram esses achados através de ensaios triaxiais, indicando que a coesão máxima de um solo com raízes pode ser até 2,39 vezes maior que a do solo sem raízes. Li et al. (2022) reportaram aumentos na coesão efetiva variando de 1,1 a 2,5 vezes, dependendo da orientação das raízes.

4.2 Efeitos no Ângulo de Atrito Interno (ϕ')

Ao contrário da coesão, o ângulo de atrito interno sofre alterações mínimas com a introdução de raízes. A lógica predominante é que as raízes funcionam como inclusões de reforço ("costura"), mas não alteram substancialmente o rearranjo e o atrito intergranular na superfície de ruptura.
Maffra et al. (2019) registraram um aumento modesto de 5,9% no ângulo de atrito em areias (de 27,38° para 29,01°) e de 14,4% em argilas . Meng et al. (2020) observaram que o maior aumento do ângulo de atrito em seus ensaios foi de apenas 1,24 vezes o valor do solo sem raízes. Li et al. (2022) reforçam que o ângulo de atrito interno efetivo muda apenas ligeiramente, confirmando que o mecanismo principal de reforço é o coesivo.

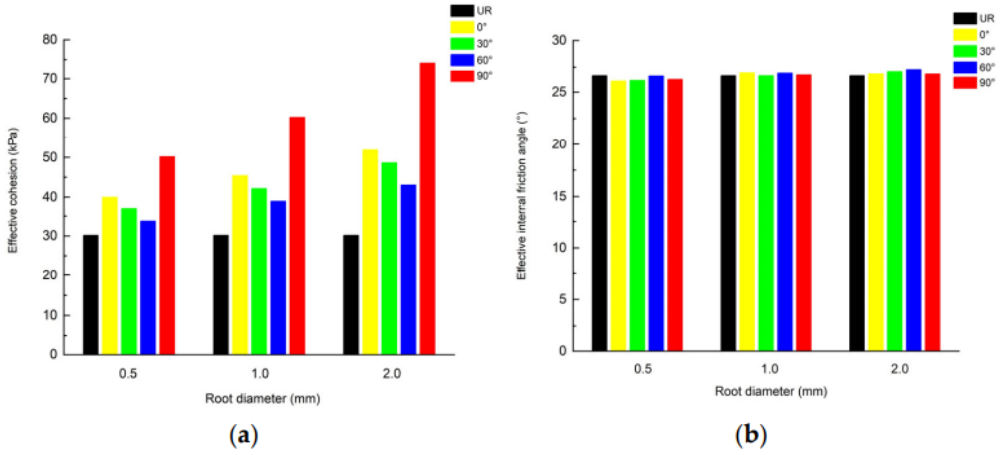


Figura 3. Variações dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo sob diferentes condições: (a) coesão e (b) ângulo de atrito. Fonte: Li et al. (2022).

4.3 Influência da Morfologia e Distribuição das Raízes

A eficácia do reforço não depende apenas da presença de vegetação, mas das características intrínsecas do sistema radicular.

4.3.1 Diâmetro da Raiz

Existe uma correlação direta entre o diâmetro da raiz e a resistência ao cisalhamento do compósito solo-raiz. Raízes de maior diâmetro exigem maior força para ruptura e proporcionam maior área de contato na interface solo-raiz . Meng et al. (2020) demonstraram que a coesão aumenta com o incremento do diâmetro das raízes. Contudo, Jian et al. (2024) alertam que a resistência à tração unitária (MPa) tende a diminuir com o aumento do diâmetro, seguindo uma função de potência.

4.3.2 Densidade de Raízes

A densidade, medida como Relação de Área de Raiz (RAR) ou densidade de biomassa (RMD), é um fator crítico. Bischetti et al. (2005) e Jian et al. (2024) constataram que quanto maior a densidade de raízes, maior a resistência à tração por unidade de volume de solo e maior a tensão de cisalhamento de pico.

4.3.3 Orientação das Raízes

A orientação das raízes em relação ao plano de cisalhamento influencia a eficiência da mobilização da resistência à tração. Meng et al. (2020) indicam que o maior reforço ocorre quando as raízes estão orientadas a 0° ou 90° em relação à horizontal, sendo menor quando o ângulo se aproxima do ângulo de falha do solo (~65°) . Li et al. (2022) observaram que a resistência diminui na ordem de orientação de 0°, 15°, 30° e 65°.

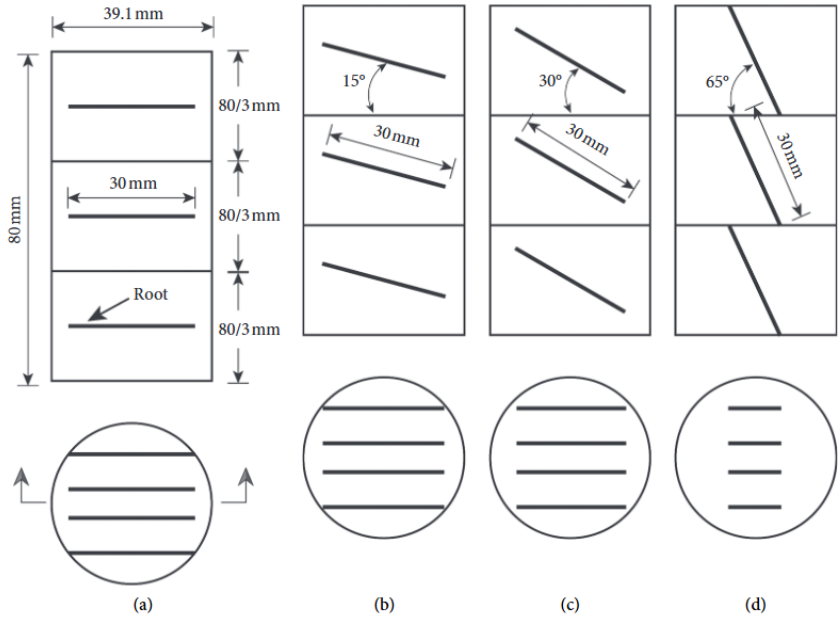


Figura 4. Distribuição de raízes com diferentes ângulos iniciais de distribuição: (a), (b), (c) e (d) correspondem aos ângulos de 0°, 15°, 30° e 65°, respectivamente. Fonte: Meng et al.

4.4 Efeitos Hidromecânicos e Deformabilidade

A interação solo-raiz vai além do reforço mecânico direto. A evapotranspiração aumenta a sucção do solo, elevando a resistência efetiva. Por outro lado, o crescimento das raízes pode gerar fissuras que aumentam a permeabilidade e reduzem a capacidade de retenção de água.
Em termos de deformabilidade, as raízes conferem maior rigidez ao solo. Maffra et al. (2019) notaram que solos arenosos com raízes suportaram tensões de cisalhamento 35,1% maiores para uma deformação horizontal de 4% em comparação ao solo nu . As raízes também controlam positivamente as deformações verticais, redistribuindo as tensões na zona de cisalhamento.

5 MODELAGEM ANALÍTICA E NUMÉRICA

A quantificação teórica do reforço radicular frequentemente recorre a modelos analíticos, sendo o modelo de Wu-Waldron (WWM) o mais difundido. O WWM calcula o incremento de coesão ($\Delta c'$) como função da resistência à tração média e da RAR, assumindo que todas as raízes falham simultaneamente .
Entretanto, evidências indicam que essa premissa simplificadora tende a superestimar a resistência real. A ruptura das raízes ocorre de forma progressiva (algumas quebram, outras são arrancadas). Shuai et al. (2022) encontraram coeficientes de correção (k') para o modelo WWM variando drasticamente entre 0,20 e 20,25, com média de 4,94, demonstrando a necessidade de ajustes locais.
Modelos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), oferecem maior detalhamento, permitindo simular a geometria 3D e a interação complexa solo-raiz. A Figura 4 exemplifica a malha gerada para esse tipo de análise computacional.

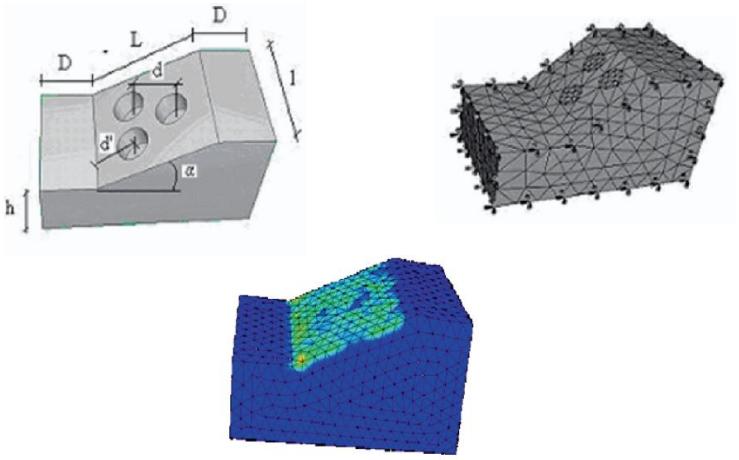


Figura 5. Exemplo do método de elementos finitos para modelar taludes com inclusão de raízes de árvores. Fonte: KOKUTSE et al. (2006) apud CASTEGNARO (2012).

Temgoua et al. (2016) utilizaram MEF 3D para concluir que a estabilidade global depende da profundidade do sistema radicular e da coesão adicional. Embora mais precisos, esses modelos exigem elevado poder computacional e caracterização rigorosa dos parâmetros de entrada.

6 LIMITAÇÕES PRÁTICAS E APLICABILIDADE EM PROJETO

Os resultados aqui compilados provêm majoritariamente de condições experimentais controladas e de solos minerais, o que exige cautela na sua transposição para o projeto. Um primeiro condicionante é a durabilidade do reforço: a contribuição das raízes depende do estado fisiológico e do ciclo de vida da vegetação, variando sazonalmente, reduzindo-se na dormência e podendo ser perdida com a senescência das plantas, quando a decomposição das raízes elimina a coesão adicional e pode criar caminhos preferenciais de fluxo. Trata-se de um reforço não permanente, que demanda manutenção da cobertura vegetal ao longo da vida útil da obra (Wu, 2013).

Ademais, a maioria dos estudos restringiu-se a solos minerais (arenosos e argilosos) com baixo teor de matéria orgânica. Solos orgânicos ou com horizontes ricos em matéria orgânica, comuns justamente nas camadas superficiais vegetadas, apresentam alta compressibilidade, elevada retenção de água e comportamento mecânico distinto, ainda pouco caracterizados no âmbito da interação solo-raiz. A extrapolação dos incrementos de coesão aqui reportados para esses materiais não é recomendável sem investigação experimental específica.

O reforço, ademais, concentra-se nas camadas superficiais, onde a densidade radicular é maior: Castegnaro (2012) registrou queda do ganho de resistência de 90,2% a 0,25 m para 12,5% a 1,5 m, e Shuai et al. (2022) observaram reforço concentrado na camada de 0–5 cm. A contribuição radicular aplica-se, portanto, sobretudo à estabilidade superficial e ao controle de erosão por meio de técnicas de bioengenharia de solos, não substituindo soluções convencionais de contenção em mecanismos de ruptura profunda.

Por fim, dada essa variabilidade e a superestimativa associada a modelos como o de Wu-Waldron, a coesão radicular raramente é adotada como parâmetro permanente nas verificações de estabilidade, sendo usualmente desconsiderada ou tratada apenas como margem complementar de segurança. No Brasil, a ABNT NBR 11682 trata a proteção vegetal como medida de proteção superficial e controle de erosão, e não como elemento estrutural de contenção, recomendando-se o emprego da bioengenharia de solos de forma complementar — e não substitutiva — aos métodos geotécnicos convencionais.

7 CONCLUSÕES

A revisão indica o potencial da vegetação como técnica complementar e sustentável na engenharia geotécnica, observados os limites de validade discutidos. As conclusões, válidas sobretudo para as condições experimentais e os solos minerais analisados, são:

1. Predominância da Coesão: nos solos minerais analisados, as raízes atuam primariamente aumentando a coesão aparente. Incrementos superiores a 200% em solos arenosos foram obtidos sob condições específicas de ensaio e não devem ser extrapolados diretamente como parâmetros de projeto. O ângulo de atrito interno sofre alterações secundárias.
2. Influência da Morfologia: o reforço é governado pelo diâmetro, densidade e orientação das raízes; raízes mais espessas, densas e perpendiculares ao plano de cisalhamento oferecem maior resistência.
3. Comportamento Deformacional: A presença de raízes aumenta a rigidez do solo, permitindo que este suporte maiores tensões para um mesmo nível de deformação.
4. Limitações dos Modelos: modelos analíticos simples (Wu-Waldron) tendem a superestimar a resistência pela premissa de falha simultânea, recomendando-se modelos numéricos ou fatores de correção baseados em ensaios in situ em projetos de maior responsabilidade.
5. Aplicabilidade e Desafios Futuros: o reforço radicular aplica-se sobretudo à estabilidade superficial e ao controle de erosão, em caráter complementar — e não substitutivo — às soluções convencionais de contenção. Permanecem como desafios os efeitos acoplados em solos não saturados e orgânicos, a durabilidade do reforço a longo prazo e a realização de mais ensaios em grande escala.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores agradecem também ao Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia (i-LITPEG) e à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pelo apoio acadêmico e ambiente de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bischetti, G. B. et al. (2005). Root Strength and Root Area Ratio of Forest Species in Lombardy (Northern Italy). Plant and Soil, 278(1-2), 11-22.

Castegnaro, A. Q. (2012). Efectos de las raíces sobre la resistencia al corte en suelos. Informe de Trabajo de Graduación. Universidad de Costa Rica.

Jian, S. et al. (2024). Study on Shear Strength of Soil-Root Systems of Different Vegetation Types. Plants, 13(21), 2963.

Li, P. et al. (2022). Study on the Shear Strength of Root-Soil Composite and Root Reinforcement Mechanism. Forests, 13(6), 898.

Maffra, C. et al. (2019). The Effect of Roots on the Shear Strength of Texturally Distinct Soils. Floresta e Ambiente, 26(3), e20171018.

Meng, S. Y., Zhao, G. Q., & Yang, Y. Y. (2020). Impact of Plant Root Morphology on Rooted-Soil Shear Resistance Using Triaxial Testing. Advances in Civil Engineering, 2020, 8825828.

Rodriguez, L. H. G. (2019). Resistencia a la tracción de un suelo con raíces y a diferentes estados hidráulicos. Trabalho Final de Máster. Universitat Politècnica de Catalunya.

Shuai, F. et al. (2022). Effects of Herbaceous Plant Roots on the Soil Shear Strength of the Collapsing Walls of Benggang in Southeast China. Forests, 13(11), 1843.

Temgoua, A. G. T., Kokutse, N. K., & Kavazović, Z. (2016). Influence of forest stands and root morphologies on hillslope stability. Ecological Engineering, 95, 622-634.

Wu, T. H. et al. (1979). Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. Canadian Geotechnical Journal, 16(1), 19-33.

Wu, T. H. (2013). Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design. Canadian Geotechnical Journal, 50(3), 259-274.

Yildiz, A. et al. (2019). Assessment of plant-induced suction and its effects on the shear strength of rooted soils. Geotechnical Engineering, 172(6), 507-519.

Zhu, H., Zhang, L. M., & Garg, A. (2018). Investigating plant transpiration-induced soil suction affected by root morphology and root depth. Computers and Geotechnics, 103, 26-31.