

Avaliação Bibliométrica de Estudos sobre a Aplicação de Modelos de Resistência ao Cisalhamento de Solos não Saturados

Myllena Cardoso Couto Maia

Engenheira Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, myllenacardoso96@gmail.com

Desireé Alves de Oliveira

Engenheira Civil, Mestre, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, desiree.alves@ufersa.edu.br

Patrícia Figueiredo de Sousa

Engenheira Civil, Mestre, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, patriciafigueiredodesousa@gmail.com

André Luís Brasil Cavalcante

Professor Associado, Doutor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, albrasilc@gmail.com

RESUMO: Para as Ciências dos Solos, a estimativa da resistência ao cisalhamento é essencial para a previsão e a solução de diversos problemas geotécnicos, como a manutenção da estabilidade de taludes e barragens de terra e para o dimensionamento de pilhas de rejeitos e de estruturas de contenção. Dessa forma, o presente estudo tem como enfoque uma análise bibliométrica temporal e crítica das publicações que abordam o tema de resistência ao cisalhamento de solos não saturados, com o objetivo de evidenciar a importância destes trabalhos para a área de Mecânica dos Solos não Saturados. Para isso, foi desenvolvido um banco de dados de publicações, utilizando as plataformas: Google Acadêmico, Scielo, Academia, Research Gate e Periódicos da CAPES. Nesse sentido, são apresentados comparativos de forma quantitativa e qualitativa dos dados, visando fornecer um panorama detalhado da relevância do tema. Além disso, o estudo inclui uma listagem e análise dos modelos mais frequentemente citados na literatura, promovendo uma comparação entre eles, discutindo as vantagens e as desvantagens associadas ao uso desses modelos para previsões da resistência de solos não saturados, fornecendo aos profissionais da área, pesquisadores e acadêmicos uma compreensão das tendências atuais, desafios e oportunidades na área da resistência ao cisalhamento de solos não saturados.

PALAVRAS-CHAVE: Mecânica dos Solos, Solos não Saturados, Resistência ao Cisalhamento, Levantamento Bibliográfico.

ABSTRACT: In Soil Sciences, estimating shear strength is crucial for predicting and solving various geotechnical problems, such as maintaining the stability of slopes and earth dams, and designing waste pile structures and retaining walls. Therefore, this study focuses on a temporal bibliometric analysis of publications addressing the shear strength of unsaturated soils, aiming to underscore the significance of these works in Unsaturated Soil Mechanics. A database of publications was developed using platforms such as Google Scholar, Scielo, Academia, Research Gate, and CAPES Journals. Accordingly, comparative quantitative and qualitative data are presented to provide a detailed overview of the topic's relevance. Furthermore, the study includes a listing and analysis of the models most frequently cited in the literature, facilitating a comparison between them and discussing the advantages and disadvantages of using these models to predict the shear strength of unsaturated soils, providing professionals in the field, researchers, and academics with an understanding of current trends, challenges, and opportunities in the area of shear strength of unsaturated soils.

KEYWORDS: Soil Mechanics, Unsaturated Soils, Shear Strength, Bibliographic Survey.

1 INTRODUÇÃO

A compreensão das propriedades mecânicas e dos modelos constitutivos para prever a resistência ao cisalhamento de solos não saturados é essencial para o dimensionamento e a mitigação de diversos problemas geotécnicos, como a estabilidade de taludes, pilhas de rejeitos, fundações e barragens. Na Mecânica dos Solos,

a resistência ao cisalhamento é influenciada por fatores como variação do nível freático, cobertura vegetal, materiais de reforço, sistemas de drenagem e grau de compactação das camadas (Sousa, 2024). Acima do nível de água, a resistência ao cisalhamento depende do conteúdo de água e das pressões de água e ar atuantes no solo.

O estudo da resistência ao cisalhamento de solos não saturados começou com Haines (1925), que investigou a influência das forças capilares na coesão. Entre 1950 e 1960, pesquisas como a de Bishop *et al.* (1960) expandiram os princípios das tensões efetivas de Terzaghi e o modelo de Mohr-Coulomb. Na década de 1980 e 1990, Delwyn Fredlund popularizou os conceitos de variáveis de estado para definir a resistência ao cisalhamento. Um avanço significativo veio com Vanapalli *et al.* (1996), que propuseram formulações baseadas na curva de retenção de água, permitindo estimar a resistência de forma mais simples e econômica.

Dentro desta temática, este artigo apresenta um estudo bibliométrico dos modelos disponíveis na literatura que estimam a resistência ao cisalhamento de solos não saturados, avaliando os mais aplicados e detalhando os parâmetros necessários para seu emprego. O objetivo deste estudo é ampliar a discussão sobre a Mecânica dos Solos Não Saturados e contribuir para a difusão do conhecimento nessa área.

Para isso, foi criado um banco de dados de títulos usando as plataformas Google Acadêmico, Scielo, Academia, Research Gate e Periódicos da CAPES. Os detalhes deste estudo são apresentados nos itens a seguir.

2 METODOLOGIA

Para esta pesquisa, realizou-se um levantamento bibliométrico usando os termos “Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados” e “*Shear Strength of Unsaturated Soils*” nas bases de dados Periódicos da CAPES, Scielo, Research Gate, Academia e Google Acadêmico. O objetivo desta etapa foi verificar as tendências de pesquisa nesse campo da Mecânica dos Solos de 1950 a 2023. Para isso, iniciou-se com uma pesquisa simplificada dos termos nas bases mencionadas, seguida de um tratamento das informações para eliminar *outliers*. Consideraram-se *outliers* os trabalhos de outras áreas ou que tratam especificamente de solos saturados.

Após o refinamento dos dados, avaliaram-se os principais modelos para previsão da resistência ao cisalhamento de solos não saturados, comparando suas diferenças, vantagens, desvantagens e métodos de obtenção de parâmetros. Um fluxograma simplificado do estudo foi elaborado para uma representação visual clara do processo metodológico conforme é apresentado na Figura 1.

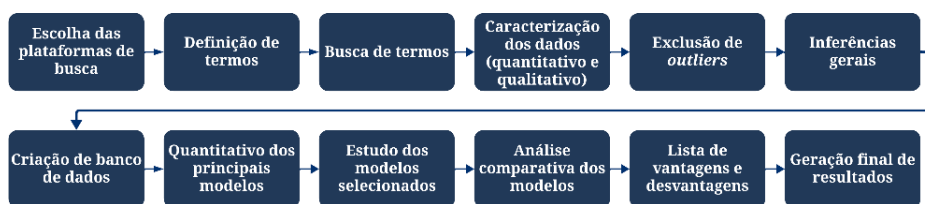


Figura 1. Fluxograma das etapas metodológicas.

Quanto aos procedimentos metodológicos, este estudo é uma pesquisa bibliográfica sobre a Mecânica dos Solos Não Saturados, conduzida por meio de análises qualitativas e quantitativas de dados da literatura. O estudo abrange o período de 1950 a 2023, descrevendo o comportamento temporal das pesquisas nesse campo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A variação das propriedades mecânicas e do comportamento dos solos devido às alterações no grau de saturação é de grande relevância para os engenheiros geotécnicos. Esse interesse decorre da necessidade de projetar, monitorar e proteger estruturas de terra de maneira eficaz e econômica. Esse aumento de demanda justifica o crescimento significativo no número de pesquisas nessa área, como será evidenciado pelos resultados do estudo bibliométrico apresentado neste artigo científico.

3.1 Busca Simplificada

Inicialmente, para obter uma visão geral do número de títulos disponíveis, foram realizadas buscas simplificadas usando os termos “*Shear Strength of Unsaturated Soils*” e “Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados” em plataformas online gratuitas, como Google Acadêmico, Scielo, Academia, Research Gate e Periódicos da CAPES. O levantamento do número de publicações no período de 1950 a 2023 está apresentado na Figura 3. Cabe destacar que o quantitativo encontrado é influenciado pela data da busca e pela ferramenta empregada. Neste caso a pesquisa apresentada é referente ao período de novembro de 2023 a fevereiro de 2024.

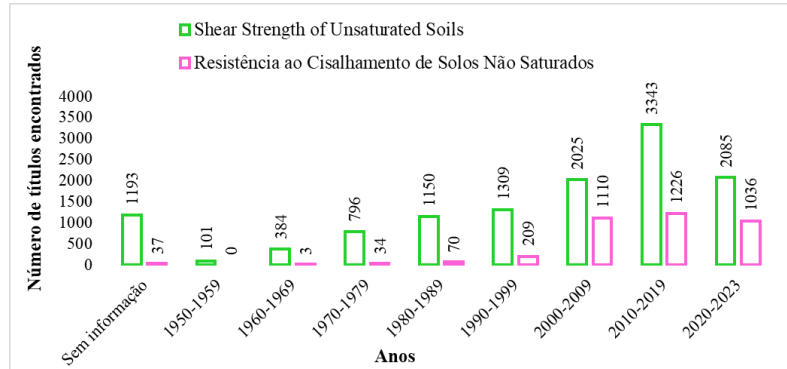
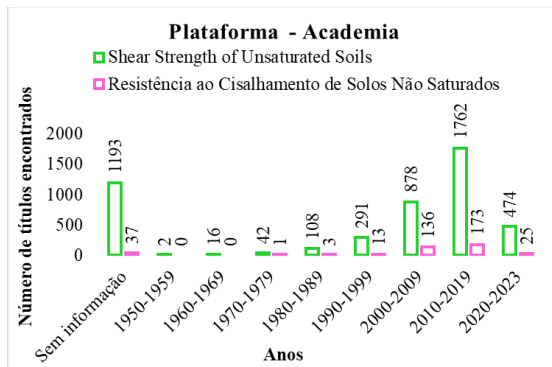
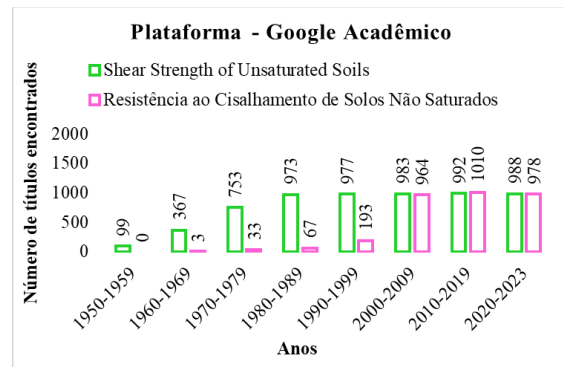


Figura 3. Pesquisa do número de títulos para os termos “*Shear Strength of Unsaturated Soils*” e “Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados” realizada no período de novembro de 2023 a fevereiro de 2024.

Deve-se destacar que o quantitativo de publicações varia conforme o site empregado, embora a tendência de comportamento ao longo dos anos seja consistente em todas as plataformas, neste caso, notou-se um aumento expressivo do número de publicações. Para demonstrar isso, obteve-se o número de títulos publicados em cada plataforma de busca, conforme mostrado na Figura 4. Essa discrepância pode ser atribuída a fatores como a abrangência da base de dados, o alcance internacional da plataforma, a preferência dos pesquisadores e o investimento no desenvolvimento do sistema de busca. O Google Acadêmico, por exemplo, gera mais opções de títulos, o que explica sua popularidade entre estudantes e profissionais, além de exibir dados de diversos periódicos e plataformas de publicações.



(a)



(b)

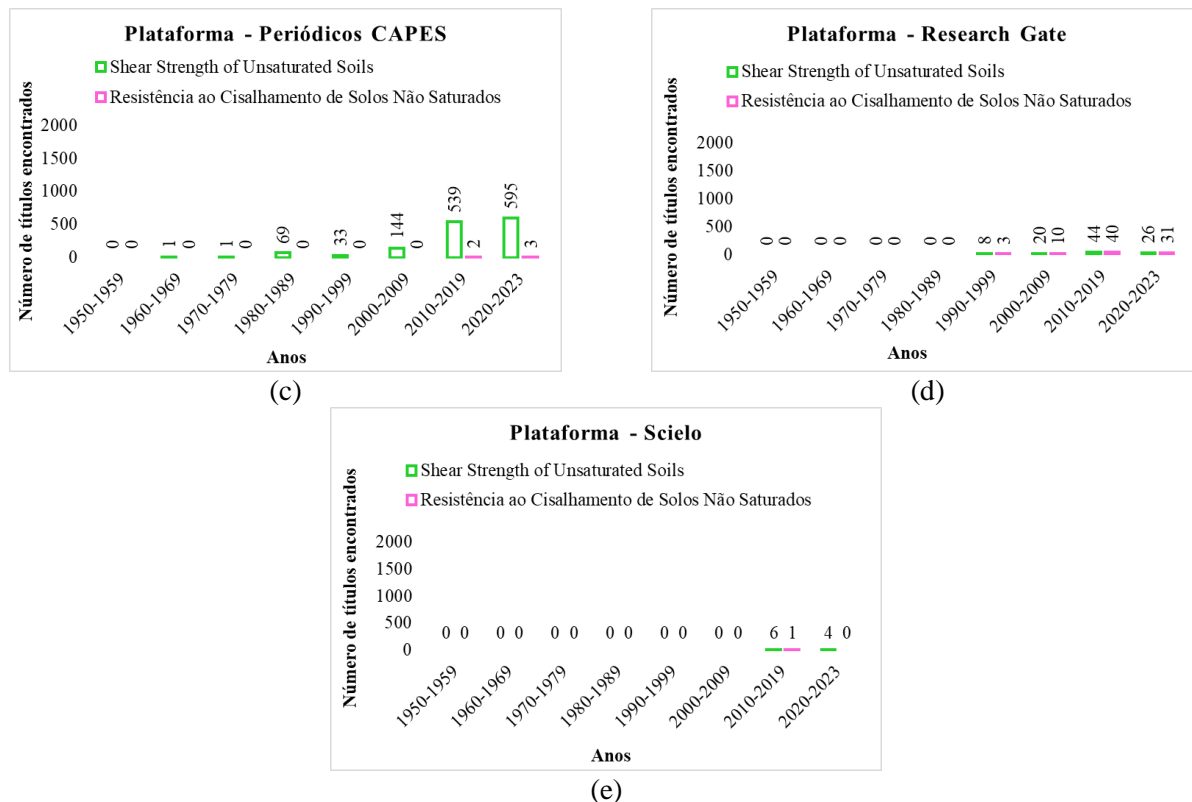


Figura 4. Pesquisa do número de títulos para os termos “*Shear Strength of Unsaturated Soils*” e “Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados” de acordo com cada plataforma.

3.2 Detalhando as Plataformas de Busca

Para entender o quantitativo observado nas Figuras 1 e 2, destacam-se os pontos limitantes da pesquisa bibliométrica. Na plataforma Academia, notou-se uma quantidade significativa de títulos sem informações sobre o ano de publicação, o que prejudica o levantamento temporal. Isso pode ser devido à limitação da plataforma em disponibilizar dados completos, à falta de catalogação adequada ou à ausência de informações fornecidas pelos autores. A falta de dados dificulta a identificação precisa do período de publicação dos artigos, impactando a capacidade dos usuários de acompanhar a evolução das pesquisas ao longo do tempo.

No Google Acadêmico e no Research Gate, a limitação no número de páginas disponíveis por intervalo de década pesquisada é significativa. O Google Acadêmico permite até 100 páginas por consulta, enquanto o Research Gate permite apenas 10. Isso significa que, independentemente do número total de artigos disponíveis para uma década, apenas os primeiros 1000 resultados são exibidos no Google Acadêmico e os primeiros 100 no Research Gate. Essa restrição pode impactar a capacidade dos pesquisadores de realizar uma busca abrangente na literatura científica sobre um determinado tópico.

Além disso, a plataforma Periódicos da CAPES e a Scielo exibem um número reduzido de títulos, o que pode ser atribuído a uma seleção mais criteriosa ou a uma menor representatividade dessas bases de dados na área de solos não saturados, especialmente para publicações em português.

Conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2, a análise de dados de cinco plataformas revela um crescimento no número de publicações a partir da década de 1950. Este crescimento inicial está vinculado ao trabalho pioneiro de Williams, publicado em 1955. Na década de 1960, houve um triplo aumento no número de títulos publicados, devido às contribuições de Bishop, que estendeu o conceito de tensões efetivas de Terzaghi para solos não saturados.

No final dos anos 70, ocorreu outra expansão significativa no volume de publicações, impulsionada pelas investigações de Delwyn Fredlund. Na década de 1980, o número de publicações sobre solos não saturados aumentou dez vezes em relação à década de 1950, refletindo o crescente interesse e a consolidação dessa área de estudo.

Durante os anos 90, destacou-se o trabalho de Vanapalli *et al.* (1996), que propôs um modelo

relacionando a resistência ao cisalhamento de solos não saturados à curva de retenção de água, oferecendo uma maneira mais acessível e econômica de determinar essa resistência. A publicação do livro “*Unsaturated Soil Mechanics*” por Fredlund & Rahardjo (1993) também se tornou uma referência essencial, consolidando conceitos e práticas fundamentais na mecânica dos solos não saturados. O aumento de trabalhos nesse período está associado à difusão da internet, popularização dos computadores e consolidação de programas de pós-graduação. O que contribuiu para o aumento de publicações em todas as áreas.

Apesar do crescimento no número de estudos, a partir de 2010, não houve avanços significativos em novas formulações ou métodos para prever a resistência ao cisalhamento de solos não saturados, devido à complexidade do comportamento desses solos e aos desafios práticos em experimentos. Entre 2020 e 2023, houve uma leve diminuição no número de publicações em comparação com a década anterior, possivelmente devido à pandemia de COVID-19 e a outros fatores.

Ainda, conforme aos gráficos apresentados, fica evidente que o termo em inglês “*Shear Strength of Unsaturated Soils*” apresenta mais títulos do que “Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados”. Isso ocorre porque o inglês é o idioma padrão nas principais revistas e eventos da área, além de haver mais fluentes nesse idioma. A discrepância também se deve aos recursos disponíveis para pesquisa, à maturidade dos cursos superiores e programas de pós-graduação em universidades estrangeiras e à maior abrangência do termo no contexto internacional. Outro fator de limitação nacional é a sofisticada e onerosa infraestrutura experimental necessária para pesquisas nessa área.

Para comparar com pesquisas em solos saturados, foram realizadas buscas simplificadas usando os termos “*Shear Strength of Saturated Soils*” e “Resistência ao Cisalhamento de Solos Saturados” nas mesmas plataformas mencionadas. O número de publicações referente a esses termos durante o mesmo período está representado na Figura 5.

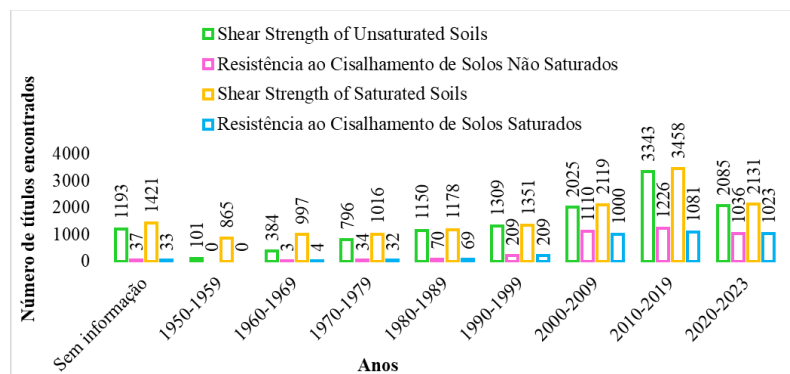


Figura 5. Pesquisa do número de títulos para os termos “*Shear Strength of Unsaturated Soils*”, “Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados”, “*Shear Strength of Saturated Soils*” e “Resistência ao Cisalhamento de Solos Saturados” realizada no período de novembro de 2023 a fevereiro de 2024.

Comparando os resultados do levantamento do número de pesquisas sobre solos não saturados e solos saturados, observa-se uma discrepância no número de publicações entre as décadas de 1960 e 1980, que diminuiu nas décadas seguintes. Essa diferença pode ser atribuída ao fato de que as formulações relativas aos modelos de solos saturados são mais conservadoras, com modelos mais simples e amplamente compreendidos pelos engenheiros geotécnicos. O maior nível de conhecimento consolidados para solos saturados facilita sua aplicação e compreensão, resultando em um volume maior de publicações nessa área.

Os avanços tecnológicos recentes contribuíram para um aumento significativo nas pesquisas e publicações sobre solos não saturados, consolidando essa área e estimulando o desenvolvimento de novos modelos e técnicas de análise. Os dados mostram essa disparidade ao longo das décadas, destacando os diferentes níveis de atividade de pesquisa entre as duas linhas de comportamento mecânico e hidráulico de solos.

Após este levantamento simplificado, surge a necessidade de uma investigação mais detalhada sobre os principais autores e modelos mais utilizados no estudo da resistência ao cisalhamento de solos não saturados.

3.3 Principais Modelos de Estudo

Para fornecer uma perspectiva das contribuições ao longo dos anos e dos modelos mais significativos na mecânica dos solos não saturados, é essencial explorar os trabalhos e autores mais citados e reconhecidos nesse campo. Isso permite uma compreensão ampla das bases teóricas e metodológicas que sustentam a investigação, além de identificar tendências e lacunas na literatura científica atual. A Tabela 1 apresenta os autores mais citados na área de resistência ao cisalhamento de solos não saturados, incluindo o modelo recente de Cavalcante & Mascarenhas (2021), com suas equações fundamentais e parâmetros de ajuste. O número de citações foi obtido da plataforma Google Acadêmico.

Tabela 1. Autores mais citados na literatura (adaptada de Vanapalli (2009)).

Autor	Equação	Parâmetros de ajuste	Número de Citações
Bishop (1960)	$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \phi'$ χ : variável que está relacionada ao grau de saturação	χ	583
Fredlund <i>et al.</i> (1978)	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$	ϕ^b	2649
Vanapalli <i>et al.</i> (1996)	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w)(\Theta^k)(\tan \phi')$	k	2206
Fredlund <i>et al.</i> (1996) equação k			
Cavalcante & Mascarenhas (2021)	$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + e^{-\delta u_a - u_w }(u_a - u_w)] \tan \phi'$	δ	22

O modelo proposto por Bishop (1960) foi uma das primeiras abordagens a considerar a influência da sucção na resistência ao cisalhamento dos solos não saturados. Para identificar como a sucção afeta a resistência do solo, o parâmetro χ foi adicionado à equação, servindo como base para estudos posteriores. A principal desvantagem deste modelo é a estimativa do parâmetro χ , embora autores como Gardner (1958) e van Genuchten (1980) tenham proposto correlações para esse parâmetro.

Fredlund *et al.* (1978) propuseram um modelo que estima o impacto da sucção na resistência por meio da tangente de um ângulo chamado ϕ^b . A principal desvantagem deste modelo é a suposição de uma relação linear entre sucção e resistência ao cisalhamento (Figura 6a), o que não ocorre na prática, pois a resistência não cresce indefinidamente com o aumento da sucção, conforme observado em dados reais de ensaios (Figura 6b).

O modelo de Vanapalli *et al.* (1996) considera a relação entre o conteúdo de água no solo e a sucção, impactando na resistência do material. Uma das principais vantagens deste modelo é a capacidade de integrar os efeitos da sucção e do teor de umidade de forma prática e direta, permitindo uma avaliação mais precisa e realista da resistência a partir de dados de ensaios como papel filtro e câmara de Richards, que são mais baratos que os ensaios de compressão triaxial e cisalhamento direto não saturados.

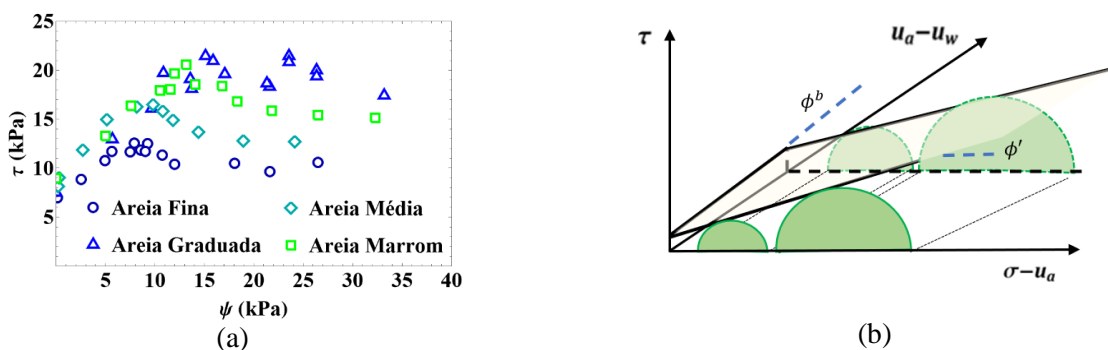
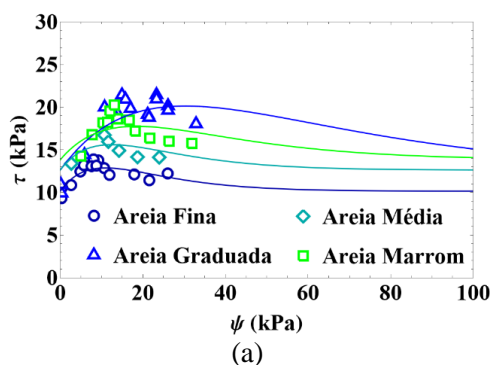


Figura 6. (a) Variação da resistência ao cisalhamento para areia de Brancaster (adaptada de Towner e Childs (1972)). (b) Envoltória de resistência de solos não saturados modelo de Fredlund *et al.* (1978).

De maneira geral, esses modelos representam diferentes abordagens para estimar a resistência ao cisalhamento de solos não saturados, cada um com suas vantagens e limitações em termos de precisão e aplicabilidade em contextos geotécnicos variados, considerando intervalos específicos de sucção.

Para solucionar dificuldades encontradas, Cavalcante & Mascarenhas (2021) propuseram um modelo que correlaciona a curva de retenção de água do solo com sua resistência não saturada, sendo extremamente útil para a prática geotécnica. Esse modelo adapta o de Bishop, permitindo estimar o parâmetro χ da curva de retenção de água ou os dados de resistência ao cisalhamento, conforme apresentado na Figura 7



Areia	δ (kPa ⁻¹)	c' (kPa ⁻¹)
Areia Fina	0,091	3,94
Areia Graduada	0,033	5,67
Areia Média	0,080	5,83
Areia Marrom	0,054	5,34

(b)

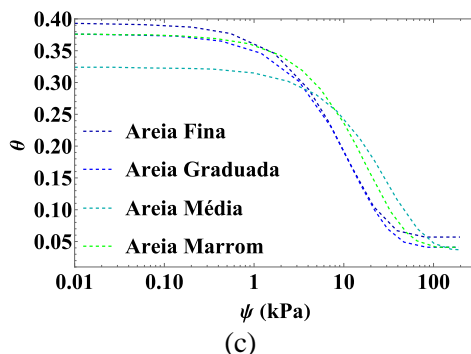


Figura 7. (a) Resistência ao cisalhamento *versus* sucção para as areias de Frankston obtidas por Donald (1956). (b) Parâmetros do solo ajustados. (c) Curva de Retenção de Água hipotética para as areias de Frankston com a suposição de que θ_s é numericamente igual a porosidade e $\theta_r=0$. (adaptadas de Cavalcante & Mascarenhas (2021)).

4 CONCLUSÕES

Este estudo destaca a importância da Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados na Engenharia Geotécnica, utilizando uma abordagem abrangente que considera diversas plataformas. A análise permitiu obter uma visão representativa do estado atual do conhecimento na área, identificando os principais modelos e autores que contribuíram significativamente para o desenvolvimento de estudos em Mecânica dos Solos Não Saturados, além de oferecer uma compreensão detalhada das tendências de pesquisa nos últimos 70 anos.

Diversos fatores podem influenciar a produção e a disponibilidade de trabalhos científicos em diferentes plataformas, desde políticas editoriais até as preferências dos pesquisadores. Essas variáveis podem resultar em variações na quantidade de publicações encontradas, sendo essencial considerar essas dificuldades ao conduzir uma pesquisa bibliométrica, pois elas impactam nos resultados e nas conclusões do estudo.

Entre os modelos mais citados estão os de Bishop *et al.* (1960), Fredlund *et al.* (1978), Vanapalli *et al.* (1996) e Fredlund *et al.* (1996). As vantagens desses modelos incluem a capacidade de fornecer estimativas razoáveis da resistência ao cisalhamento com base em parâmetros mensuráveis, como tensão normal, sucção do solo e teor de umidade. No entanto, cada modelo apresenta limitações associadas à sensibilidade dos parâmetros, necessitando de cuidadosa calibração para garantir resultados confiáveis.

Cavalcante & Mascarenhas (2021) propuseram um modelo inovador que permite uma correlação direta entre a curva de retenção de água do solo e a resistência ao cisalhamento, possibilitando uma estimativa dos

parâmetros de resistência com base em características de retenção mensuráveis do solo e fundamentado em um modelo de fluxo analítico.

Este estudo bibliométrico teve como objetivo proporcionar uma compreensão ampla das tendências de pesquisa e dos modelos mais influentes na área da mecânica dos solos não saturados. Ao considerar as vantagens e desvantagens de cada modelo e analisar as conclusões dos autores mais citados, este estudo auxilia na difusão do tema de resistência ao cisalhamento de solos não saturados.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES 88887.696799/2022-00), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 306975/2023-8) e pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF Projeto 00193-00001609/2023-44).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bishop, A. W. T., Alpan, I., Blight, G. E. & Donald, I. B. (1960). Factors Controlling the Strength of Partly Saturated Cohesive Soils. *Proc. 5th Intern. Conf. on Soil. Mech Foundation Engineering*, Paris, 1, 13–21.
- Cavalcante, A. L. B., & Mascarenhas, P. V. (2021). Efficient Approach in Modeling the Shear Strength of Unsaturated Soil Using Soil Water Retention Curve. *Acta Geotechnica* 16(10), 3177–3186.
- Donald, I. B. (1956) Shear Strength Measurements in Unsaturated Non-Cohesive Soils with Negative Pore Pressures. *Proc. 2nd Australia–New Zealand Conf. on Soil Mech and Foundation Engineering*, Christchurch, New Zealand. Technical Publications Ltd., Wellington, New Zealand, pp 200-204.
- Fredlund, D. G. & H Rahardjo. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. & Widger, R. A. (1978). The Shear Strength of Unsaturated Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313–321.
- Fredlund, D. G., Xing, A., Fredlund, M. D. & Barbour, S. L. (1996). Relationship of the Unsaturated Soil Shear Strength to the Soil-Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal* 33(3), 440-448.
- Gardner, W. R. (1958). Some Steady-State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to Evaporation from a Water Table. *Soil Science*, 85(4), 228–232.
- Haines, W. P. (1925). Studies in the Physical Properties of Soils: II. A Note on the Cohesion Developed by Capillary Forces in an Ideal Soil. *Journal of Agricultural Science* 15(4), 529–535.
- Sousa, P. F. de. (2024). *Modelo Constitutivo para a Previsão da Resistência ao Cisalhamento não Saturada usando a Curva de Retenção de Água de Solos Uni e Multimodais*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Universidade de Brasília.
- Towner, G. D. & Childs, E. C. (1972). The Mechanical Strength of Unsaturated Porous Granular Material. *Journal of Soil Science*, 23(4), 481–498.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. & Clifton, A. W. (1996). Model for the Prediction of Shear Strength with Respect to Soil Suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 379–392.
- Vanapalli, S. K. (2009). Shear Strength of Unsaturated Soils and its Applications in Geotechnical Engineering Practice. *In Keynote Address. Proc. 4th Asia-Pacific Conf. on Unsaturated Soils*. New Castle, Australia 579-598.
- Williams, A. A. B. W. (1995). *Shear Strength of Unsaturated Soils*. *Civil Engineering=Siviele Ingenieurswese*, 12, 473-476.