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/COBRAMSEG2026.6/48

Modelagem numérica para compreender os mecanismos de transferência de carga em aterros sobre estacas reforçados com geossintético

Juliana Araujo da Cunha,
Engenheira, EGIS Group, Sao Paulo, Brasil, araujodacunhajuliana@gmail.com

Juan Félix Rodrigues Rebolledo,
Professor,Universidade de Brasília ,Brasília, Brasil, jrodriguezr72@unb.br

Ennio Marques Palmeira,
Professor,Universidade de Brasília ,Brasília, Brasil, palmeira@unb.br

RESUMO: Projetos de infraestrutura que exigem rigoroso controle de recalques, como ferrovias e rodovias, enfrentam desafios significativos ao construir aterros sobre solos moles. Entre as estratégias disponíveis para mitigar recalques diferenciais, destaca-se o uso de aterros sobre estacas reforçados com geossintéticos. Para otimizar essa técnica, é essencial uma compreensão aprofundada da interação solo-reforço. Modelos físicos e numéricos permitem a análise detalhada da resposta do solo e dos mecanismos de transferência de carga. Este estudo apresenta uma modelagem numérica bidimensional de um ensaio em grande escala de um aterro sobre estacas reforçado com geossintéticos, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) e modelos constitutivos avançados para simular com precisão o comportamento do solo e do material geossintético. Realizaram-se análises comparativas entre métodos analíticos existentes, modelos físicos e modelos numéricos. Os resultados obtidos ampliam o entendimento dos processos de transferência de carga e sugerem que as normas atuais podem fornecer soluções seguras e econômicas, especialmente quando combinadas com simulações numéricas.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo Numérico, Modelo Análitico, Geossintético, Solos Moles, Rodovias.

ABSTRACT: Infrastructure projects that require rigorous settlement control, such as railways and highways, face significant challenges when constructing embankments on soft soils. Among the available strategies to mitigate differential settlements, the use of piled embankments reinforced with geosynthetics stands out. To optimize this technique, an in-depth understanding of soil-reinforcement interaction is essential. Physical and numerical models enable detailed analysis of soil response and load transfer mechanisms. This study presents a two-dimensional numerical modeling of a large-scale test of a geosynthetic-reinforced piled embankment, using the Finite Element Method (FEM) and advanced constitutive models to accurately simulate the behavior of the soil and geosynthetic material. Comparative analyses were conducted between existing analytical methods, physical models, and numerical models. The results obtained enhance understanding of load transfer processes and suggest that current standards can provide safe and economical solutions, especially when combined with robust numerical simulations.

KEYWORDS: Numerical model, analytical model, geosynthetic, soft soils, highway.

1 INTRODUÇÃO

O uso crescente de aterros sobre solos moles tem impulsionado o desenvolvimento de soluções geotécnicas mais eficazes e seguras, dentre as quais se destacam os aterros estaqueados reforçados com geossintéticos. Esses sistemas compostos integram estacas profundas, geossintéticos e camadas de solo compactado para reduzir recalques e aumentar a estabilidade estrutural global. Apesar da consolidação de metodologias de dimensionamento internacionalmente reconhecidas, como as estabelecidas pela norma

britânica BS 8006 (2010), pela diretriz alemã EBGEO (2011) e pela recomendação holandesa CUR 226 (2016), ainda persistem lacunas de conhecimento quanto à distribuição real de tensões no corpo do aterro, particularmente no que se refere ao efeito de arqueamento e ao comportamento in situ dos geossintéticos.

Aplicações relevantes dessa técnica podem ser encontradas em diversas regiões do mundo. Na Holanda, por exemplo, a rodovia N210 foi construída sobre solos moles com o uso de reforço com geotêxtil, assegurando estabilidade estrutural em condições geotécnicas desafiadoras. De forma semelhante, o viaduto da autoestrada A52, na Alemanha, empregou com sucesso aterros estaqueados. No Brasil, onde extensos depósitos de solos moles ocorrem ao longo das regiões costeiras, especialmente na Baixada Fluminense (RJ), Baixada Santista (SP), Recife (PE), Porto Alegre (RS) e Florianópolis (SC), inúmeros projetos têm demonstrado a eficiência dessa técnica. Exemplos notáveis incluem a ferrovia Ferronorte em Chapadão do Sul (MS) e a interligação entre as rodovias Presidente Dutra e Carvalho Pinto em São José dos Campos (SP), onde foi aplicado reforço com geogrelha durante a fase inicial de construção. Outro caso significativo é a rodovia BR-364 em Jataí (GO), também implantada sobre solos de baixa resistência com o uso de reforços geossintéticos (Huesker, 2024).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo comparar os métodos normativos de dimensionamento mais comuns para aterros estaqueados. A análise busca avaliar com maior precisão a resposta estrutural, com foco na distribuição de tensões,e nas forças de tração distribuida nos geossintéticos. Os resultados numéricos são comparados com dados laboratoriais, previsões analíticas e simulações numéricas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF/FEM), a fim de avaliar a representatividade do modelo desenvolvido.

Resultados preliminares indicam que o MEF é capaz de reproduzir com precisão o fenômeno de arqueamento, apresentando resultados consistentes com o método dos arcos concêntricos (CA) proposto por Van Eekelen (2015). Além disso, a investigação evidencia limitações na representação do efeito de membrana, associado à mobilização da resistência à tração do geossintético, dentro de estruturas convencionais de MEF. Esse achado sugere que modelos discretos, capazes de capturar o comportamento individual das partículas de solo e do reforço, podem ser mais adequados para simular de forma realista a ação de membrana.

Esta pesquisa contribui para uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos das distribuição de tensões dos aterros estaqueados reforçados com geossintéticos e oferece subsídios técnicos para auxiliar projetistas na seleção de metodologias de dimensionamento apropriadas, ampliando a segurança e a relação custo-benefício na prática da engenharia geotécnica.

2 ATERRO ESTAQUEADO

Sistemas de aterro estaqueado são amplamente aplicados em regiões com solos moles, que apresentam baixa capacidade de suporte e são suscetíveis a recalques excessivos. Eles também são eficazes em áreas com solos colapsíveis, nas quais o aumento de umidade e de carregamento pode levar a deformações repentinas do terreno. Essa técnica combina métodos convencionais de terraplenagem com sistemas de fundações profundas, transferindo as cargas do aterro para camadas mais profundas e mais competentes do solo. O objetivo principal é minimizar ou eliminar os recalques excessivos que ocorreriam caso o aterro fosse construído diretamente sobre solos fracos, aumentando, assim, a estabilidade e a segurança global da estrutura.

De acordo com Souza e Marques (2013), a utilização de aterros estaqueados possibilita acelerar a construção sem a necessidade de aguardar a consolidação das camadas de solo mole. Em contraste, métodos convencionais de aterro frequentemente exigem prazos maiores devido à lentidão do processo de consolidação primária. Dessa forma, os aterros estaqueados não apenas reduzem a duração da obra, como também mitigam deformações do terreno e recalques diferenciais.

Para melhorar ainda mais o desempenho, os aterros estaqueados são frequentemente combinados com técnicas de solo reforçado. Entre as alternativas disponíveis, os geossintéticos têm se tornado cada vez mais utilizados devido à sua eficiência técnica e viabilidade econômica. Em aterros reforçados, os geossintéticos podem desempenhar dupla função: reforço estrutural e facilitação da drenagem, acelerando a consolidação. Neste estudo, o enfoque é sobre sua função do geossintético como elemento de reforço. A inclusão de geossintéticos permite a construção de aterros mais altos, taludes mais íngremes e execução mais rápida do que seria viável sem reforço. Além disso, eles otimizam a distribuição de tensões em solos de baixa resistência e aumentam significativamente a margem de segurança do sistema (Palmeira, 2018).

2.1 Mecanismo de Transferância de Carga

Em sistemas de aterro estaqueado, a interação entre os elementos estruturais e o material de aterro dá origem a um fenômeno de redistribuição de tensões conhecido como efeito de arqueamento. Esse mecanismo resulta em maiores concentrações de tensões sobre elementos rígidos, como capitéis/blocos de coroamento e colunas/estacas, enquanto reduz as tensões nas zonas de menor rigidez situadas entre eles. A presença desse efeito favorece a transferência de carga para as estacas e limita a tensão vertical atuante no solo mole subjacente.

Quando o reforço com geossintéticos é incorporado ao sistema, um mecanismo adicional é ativado. O geossintético, ao ser submetido a recalques diferenciais ou carregamentos, desenvolve forças de tração que ajudam a redirecionar parte da carga do aterro para as cabeças das estacas. Esse comportamento é conhecido como efeito de membrana e contribui para reduzir ainda mais o carregamento transmitido ao solo mole de fundação, por meio da mobilização da resistência à tração do reforço.

A interação solo–estrutura e os mecanismos de transferência de carga associados a sistemas estaqueados reforçados são complexos e ainda não são plenamente compreendidos. Um aspecto importante para o desenvolvimento do efeito de arqueamento é a altura mínima de aterro, frequentemente denominada altura crítica. Acima desse limiar, a camada de distribuição de cargas torna-se suficientemente rígida para permitir a formação efetiva do arqueamento de tensões. Portanto, o comportamento do material granular empregado nessa camada é de grande importância. Em geral, aterros granulares são preferidos devido às suas propriedades mecânicas relativamente estáveis, mesmo em condições saturadas.

Para compreender e quantificar esses mecanismos, empregam-se modelos físicos e numéricos. A modelagem física fornece evidências experimentais do comportamento estrutural, enquanto a modelagem numérica permite investigar, com maior detalhamento, parâmetros específicos, distribuição de tensões no solo, espaçamento entre estacas e tração no geossintético. Em particular, o Método dos Elementos Finitos (MEF/FEM) é amplamente utilizado para simular interações complexas em aterros estaqueados reforçados. Neste estudo, o MEF foi empregado para modelar o sistema solo–reforço–estrutura, fornecendo uma base robusta para avaliar os processos de transferência de carga e validar previsões analíticas.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi estruturada em etapas sequenciais, integrando dados experimentais, modelagem numérica e métodos analíticos para avaliar de forma abrangente o comportamento de aterros estaqueados reforçados com geossintéticos.

- Etapa 0 – Ensaios experimentais em laboratório

Esta etapa inicial consistiu na coleta de dados de caracterização dos materiais, tanto do solo de aterro quanto do reforço geossintético. O objetivo foi definir parâmetros iniciais e padrões de comportamento para o desenvolvimento subsequente do modelo numérico. Os dados foram obtidos a partir do modelo físico desenvolvido e ensaiado em laboratório por Melchior Filho (2022), fornecendo condições controladas para apoiar a calibração do modelo.

- Etapa 1 – Definição da malha numérica (2D)

Foi criado um modelo bidimensional axissimétrico por elementos finitos para simular um capitel/bloco de coroamento central com um vão preenchido por material de aterro reforçado. Os parâmetros de entrada e as condições de contorno foram definidos para reproduzir a configuração do modelo físico desenvolvida por Melchior Filho (2022), assegurando uma representação realista das condições de campo.

- Etapa 2 – Calibração do modelo constitutivo

A seleção e a calibração do modelo constitutivo buscaram garantir a reprodução fiel do comportamento observado em laboratório, tanto para o solo do aterro quanto para o material geossintético. Com base em ensaios de cisalhamento direto realizados por Melchior Filho (2022), os parâmetros foram ajustados de modo a alinhar a resposta numérica aos resultados experimentais.

- Etapa 3 – Análise de sensibilidade da malha

Realizou-se uma análise de convergência de malha para avaliar a influência da densidade de discretização (tamanho e distribuição dos elementos) na precisão e confiabilidade dos resultados das simulações numéricas. Isso permitiu assegurar que o modelo computacional fornecesse resultados estáveis e precisos, sem custo computacional excessivo.

- Etapa 4 – Desenvolvimento de programa analítico de dimensionamento

Foi desenvolvida uma ferramenta computacional para realizar cálculos estruturais com base em métodos analíticos comumente aplicados aos efeitos de arqueamento e membrana. O objetivo dessa ferramenta é automatizar o processo de dimensionamento e apoiar a tomada de decisão na otimização de projetos de aterros estaqueados reforçados.

- Etapa 5 – Análise do efeito de arqueamento

Esta fase envolveu a simulação do efeito de arqueamento no corpo do aterro, quantificando a distribuição de tensões verticais e sua concentração sobre o capitel/bloco de coroamento central. A análise também avaliou o papel estrutural do reforço geossintético na redistribuição de cargas e no aumento da estabilidade do sistema.

- Etapa 6 – Comparação com métodos analíticos e dados experimentais

A etapa final consistiu na validação do modelo numérico por meio da comparação com previsões analíticas e com os resultados dos ensaios laboratoriais.

A Figura 1 ilustra o estudo de caso, destacando os modelos experimental e numérico. A Figura 2 apresenta a instrumentação empregada em ambos os modelos, enquanto a Figura 3 mostra a malha de elementos finitos juntamente com a geometria desenvolvida neste estudo.

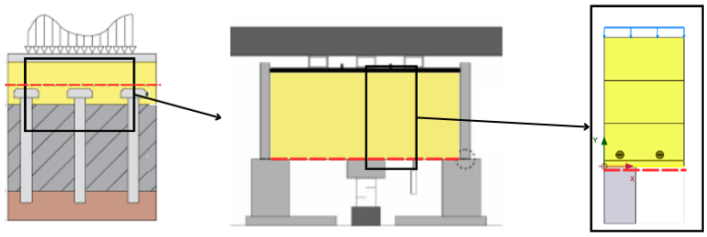


Figura 1. Modelo experimental e numérico do estudo de caso

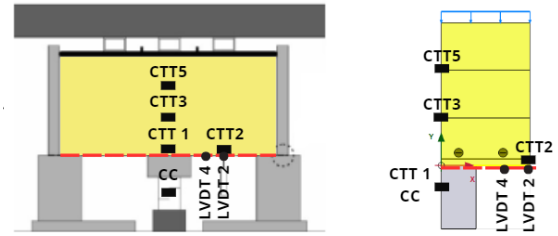


Figura 2. Instrumentação do modelo físico e numérico

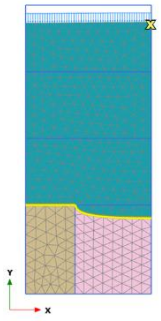


Figura 3. Malha de elementos finitos e geometria adotadas no estudo.

4 RESULTADOS

Foi desenvolvida uma simulação numérica bidimensional utilizando o modelo Hardening Soil (Schanz et al., 1999; Brinkgreve et al., 2015) para representar o comportamento tanto do solo do aterro quanto do solo de fundação. Esse modelo constitutivo avançado foi selecionado por ser capaz de reproduzir a resposta de uma ampla variedade de solos, incluindo materiais coesivos e granulares. Os parâmetros do modelo foram calibrados com base nos resultados do modelo físico reportados por Melchior Filho (2022).

A calibração foi realizada por meio de uma simulação numérica do ensaio de cisalhamento direto, considerando condições de estado plano de tensões e condições de contorno consistentes com aquelas utilizadas nos ensaios laboratoriais de Melchior Filho (2022). Esse procedimento forneceu os parâmetros adotados no presente estudo.

Propriedades	**Símbolos**	**Valor**	**Unidade**
Peso Específico	γ	16	kN/m³
Parâmetros de Resistência			
Coesão	c	0.1	kPa
Ângulo de Atrito	ϕ	43	°
Ângulo de Dilatância	ψ	10	°
Parâmetros de Rigidez			
Módulo de Rigidez Secante de Refrência	E_{50}^{ref}	10	MPa
Módulo de Rigidez Odométrico de Referência	E_{eod}^{ref}	8	MPa
Módulo de Rigidez de Descarga e Recarga de Referência	E_{ur}^{ref}	30	MPa
Potência para Função Hiperbólica	m	0.5	–
Parâmetros Avançados			
Relação de Poisson para condições de descarga-recarga	ν_{ur}	0.2	–
Pressão de Referência	p'_{ref}	100	kPa

Os parâmetros calibrados foram comparados aos dados laboratoriais para avaliar o desempenho do sistema. Além disso, aplicou-se regressão estatística para avaliar a relação entre os resultados experimentais e numéricos.

Os resultados evidenciam a variação da tensão vertical (σ) em função da razão entre a altura do aterro e o espaçamento entre estacas (H/d). As medições foram obtidas a partir de células de tensão e de carga posicionadas acima do bloco de coroamento central, conforme mostrado nas Figuras 4(a) e 4(b). A altura do aterro (H) foi definida como:

$$H = h + \frac{P}{\gamma} \tag{1}$$

em que h é a altura do aterro no modelo (0,15; 0,30; e 0,45 m), P é a sobrecarga superficial (10; 25; e 40 kPa) e γ é o peso específico do material do aterro (16 kN/m³).

O modelo numérico permitiu o estudo do comportamento estrutural sob diferentes condições. Após ajustes e comparação com modelos físicos e analíticos, o comportamento simulado foi validado. Essas medições possibilitaram uma avaliação detalhada da distribuição de tensões. Em seguida, foi realizada uma comparação com as principais normas de dimensionamento de aterros estaqueados: a norma britânica (BS 8006, 2010), a diretriz alemã (EBGEO, 2011) e o código holandês (CUR 226, 2016)-CA.

Os resultados da Figura 5 indicam que o aumento da largura do capitel (a) e a redução do espaçamento entre estacas (s_x), em geral, levam a uma maior transferência de tensões para as estacas, intensificando o efeito

de arqueamento. Observou-se que os parâmetros geométricos exercem maior influência na distribuição de cargas no interior do aterro do que as próprias propriedades do solo. A Figura 6 ilustra o efeito do espaçamento entre estacas na eficiência global do sistema.

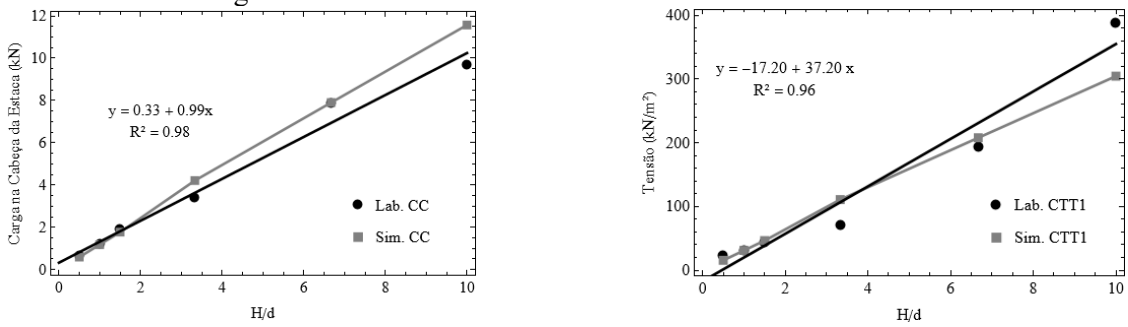


Figura 4. Resultados: (a) Carga sobre a estaca central, (b) Comparação entre os valores previstos e medidos das tensões internas para diferentes valores de H/d

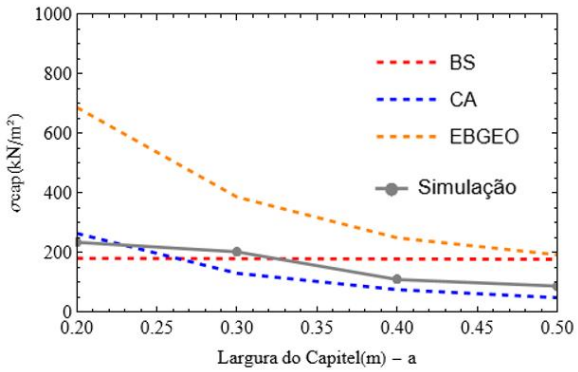


Figura 5. Tensão no capitel central para diferentes métodos

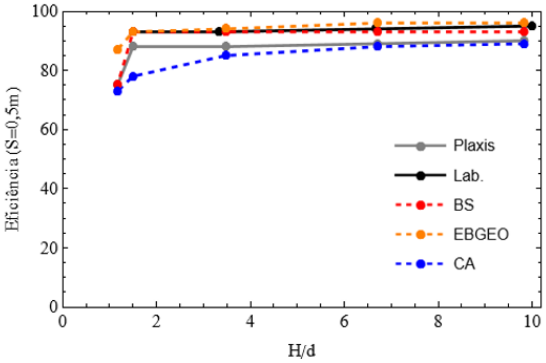


Figura 6. Eficiência do Modelo

5 CONCLUSÃO

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem se mostrado uma ferramenta essencial para análises geotécnicas, oferecendo uma estrutura robusta para investigações detalhadas do comportamento estrutural sob diversas condições de solo. Um elemento-chave para o sucesso das simulações numéricas é a seleção criteriosa e a calibração adequada do modelo constitutivo utilizado para representar o comportamento dos materiais do aterro. Modelos avançados, embora proporcionem maior precisão, exigem validação minuciosa devido ao grande número de parâmetros e à complexidade de sua formulação.

Neste estudo, a calibração numérica do material de preenchimento do aterro reforçado foi realizada com sucesso, resultando em um modelo representativo para a simulação de sistemas de aterros estaqueados reforçados. Os principais resultados são resumidos a seguir:

5.1 Efeito de Arqueamento:

O modelo numérico apresentou boa concordância com os dados experimentais e com os métodos analíticos, especialmente com o método dos Arcos Concêntricos (CA) proposto por Van Eekelen (2015). Enquanto a norma britânica (BS 8006) forneceu previsões conservadoras, a diretriz alemã (EBGEO) tendeu a superestimar a transferência de carga para menores alturas de aterro, provavelmente devido a suas premissas de projeto mais cautelosas. A consistência entre os resultados numéricos e laboratoriais confirma a confiabilidade do modelo em MEF desenvolvido para capturar os mecanismos de transferência de carga em sistemas de aterros estaqueados reforçados.

5.2 Forças de Tração no Geossintético:

A análise revelou a dificuldade inerente de medir com precisão as forças de tração nos geossintéticos em condições laboratoriais, destacando a importância das simulações numéricas para suprir lacunas experimentais. O modelo em MEF também apresentou limitações na representação realista do efeito membrana — mecanismo essencial relacionado à mobilização da tração no geossintético. Isso sugere que modelos baseados no método dos elementos discretos, capazes de simular o comportamento individual das partículas de solo e do reforço, podem ser mais adequados para representar com maior fidelidade a ação de membrana.

Em síntese, a modelagem numérica conduzida neste estudo contribuiu de forma significativa para o aprofundamento da compreensão dos mecanismos críticos em sistemas de aterros estaqueados reforçados, especialmente o efeito de arqueamento e eficiência no sistema. A integração de abordagens numéricas, analíticas e experimentais constitui uma estrutura abrangente para avaliação e dimensionamento de aterros reforçados sobre solos moles. Os resultados obtidos oferecem diretrizes técnicas relevantes para engenheiros geotécnicos, promovendo soluções de infraestrutura mais seguras e economicamente eficientes.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 131292/2023-4) e pelo Programa de Pós-graduação de Geotecnia da Universidade de Brasília (PPGG-UnB).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, M. S. S. & Marques, M. E. S. (2013). Design and Performance of Embankments on Very Soft Soils. Taylor & Francis, London, UK.

BS 8006–1. (2010). Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. British Standards Institution, ISBN 978-0-580-53842-1.

CUR 226. (2016). Design Guideline Basal Reinforced Piled Embankments. Eds.: S.J.M. van Eekelen & M.H.A. Brugman. Revision of the Design Guideline CUR226. (In English). SBRCURnet & CRC press, Delft, in press, ISBN 9789053676240.

EBGEO (2011). Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements – EBGEO. Germany. ISBN 978-3-433-60093-1.

Hewlett, W.J. & Randolph, M.F. (1988). Analysis of piled embankments. Ground Engineering, Abril 1988, Vol 22, N° 3, pp. 12–18

Huesker (2024). Casos de Obra –Volume I. Brasil [Online] Available at: https://www.huesker.com.br/noticias/detail-view/e-book-casos-de-obras/ [Accessed 8th June 2025].

Melchior Filho, J. (2022). Estudo da interação solo-reforço geossintético em aterros estaqueados por meio de ensaios de grandes dimensões. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 135 p.

Palmeira, E. M. (2018). Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.

Van Eekelen, S.J.M. (2015). Basal Reinforced Piled Embankments. PhD thesis Technical University of Delft, Holanda. 274p. ISBN 978-94-6203-825-7.