

DESEMPENHO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) EM ATERROS SOBRE SOLOS MOLES: ESTUDO DE CASO DA RODOVIA BR-101, BRASIL

PERFORMANCE OF EXPANDED POLYSTYRENE (EPS) IN BACKFILLS ON SOFT SOILS: CASE STUDY OF HIGHWAY BR-101, BRAZIL

GABRIEL PESSOA PAIVA
EXÉRCITO BRASILEIRO

DÉBORA CAMILLY SILVA DE ARAÚJO
MUST UNIVERSITY

Comunicação:

O XIII SINGEP foi realizado em conjunto com a 13th Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge), em formato híbrido, com sede presencial na UNINOVE - Universidade Nove de Julho, no Brasil.

DESEMPENHO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) EM ATERROS SOBRE SOLOS MOLES: ESTUDO DE CASO DA RODOVIA BR-101, BRASIL

Objetivo do estudo

Avaliar a viabilidade técnica, construtiva e econômica do uso de poliestireno expandido (EPS) como material leve em aterros sobre solos moles na duplicação da BR-101, analisando desempenho geotécnico, estabilidade, controle de recalques e custo-benefício frente a métodos convencionais.

Relevância/originalidade

O estudo oferece análise inédita e comparativa de soluções geotécnicas para solos moles, usando dados instrumentados da BR-101. Destaca vantagens do EPS em desempenho estrutural, prazo e custo, contribuindo para preencher lacuna de estudos aplicados no contexto brasileiro.

Metodologia/abordagem

Revisão sistemática da literatura, levantamento de dados instrumentados e comparativos técnicos de cinco soluções construtivas, incluindo EPS. Análises de estabilidade, recalques e custo foram conduzidas, integrando resultados de campo, parâmetros geotécnicos e projeções econômicas, com foco no desempenho e viabilidade da solução.

Principais resultados

O EPS reduziu recalques em mais de 60%, manteve estabilidade com $FS \geq 1,4$ e reduziu o tempo de execução pela metade. O custo atualizado confirmou vantagem econômica frente a alternativas, mesmo após revisão de projeto por evento extremo de inundação.

Contribuições teóricas/metodológicas

Amplia conhecimento sobre aplicação de EPS em solos moles no Brasil, propondo diretrizes para dimensionamento, controle construtivo e mitigação de riscos de flutuação. Fornece abordagem comparativa integrando desempenho técnico, custo e logística, útil para futuras pesquisas e padronizações normativas.

Contribuições sociais/para a gestão

Oferece subsídios para decisões de órgãos públicos e construtoras em obras sobre solos moles, reduzindo custos, prazos e impactos ambientais. Demonstra potencial do EPS para ampliar viabilidade de projetos em regiões críticas, otimizando recursos e melhorando infraestrutura nacional.

Palavras-chave: Poliestireno Expandido, Solos Moles, Aterro Leve, Recalques, Estabilidade Geotécnica

*PERFORMANCE OF EXPANDED POLYSTYRENE (EPS) IN BACKFILLS ON SOFT SOILS:
CASE STUDY OF HIGHWAY BR-101, BRAZIL*

Study purpose

Evaluate the technical, construction, and economic feasibility of using expanded polystyrene (EPS) as lightweight fill in embankments over soft soils along the BR-101 duplication, analyzing geotechnical performance, stability, settlement control, and cost-benefit compared to conventional methods.

Relevance / originality

The study provides a novel comparative analysis of geotechnical solutions for soft soils using instrumented data from BR-101. It highlights EPS advantages in structural performance, schedule, and cost, addressing a gap in applied studies within the Brazilian context.

Methodology / approach

Systematic literature review, collection of instrumented data, and technical comparison of five construction solutions, including EPS. Stability, settlement, and cost analyses integrated field results, geotechnical parameters, and economic projections, focusing on performance and feasibility of the adopted solution.

Main results

EPS reduced settlements by over 60%, maintained stability with $FS \geq 1.4$, and halved construction time. Updated cost analysis confirmed economic advantage over alternatives, even after project redesign due to an extreme flood event.

Theoretical / methodological contributions

Expands knowledge on EPS application in Brazilian soft soils, proposing guidelines for design, construction control, and flotation risk mitigation. Provides a comparative approach integrating technical performance, cost, and logistics, supporting future research and regulatory standardization.

Social / management contributions

Provides input for public agencies and contractors in soft-soil projects, reducing costs, schedules, and environmental impacts. Demonstrates EPS potential to expand project feasibility in critical regions, optimizing resources and improving national infrastructure.

Keywords: Expanded Polystyrene, Soft Soils, LightWeight Fill, Settlements, Geotechnical Stability

DESEMPENHO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) EM ATERROS SOBRE SOLOS MOLES: ESTUDO DE CASO DA RODOVIA BR-101, BRASIL

1 Introdução

No Brasil, o sistema de transporte rodoviário é o principal modal de transporte. Caracteriza-se por sua simplicidade operacional em comparação a outros modais existentes, como aéreo, ferroviário e hidroviário. Apesar do aumento dos investimentos no setor, o Brasil ainda está atrasado em relação ao desenvolvimento de infraestrutura de países mais industrializados.

Nesse contexto de evolução da malha rodoviária brasileira, há uma crescente demanda por estudos mais abrangentes e detalhados sobre as condições de projeto e construção, particularmente para aterros construídos sobre solos moles. A engenharia moderna tornou possível a implementação de soluções técnicas que antes eram inviáveis. Nesse sentido, este estudo apresenta múltiplas abordagens para avaliar a solução geotécnica adotada para o aterro construído sobre solos moles ao longo da rodovia BR-101, próximo à cidade de Goiana, no estado de Pernambuco. A avaliação leva em consideração tanto os parâmetros de resistência ao cisalhamento da argila mole quanto as propriedades mecânicas do poliestireno expandido (EPS), incluindo considerações do projeto atual sobre o potencial de flutuação do EPS.



Figura 1 – Localização dos aterros (Souza,2018)

Este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica e o desempenho geotécnico do uso de EPS como material leve de preenchimento de aterro no projeto de duplicação da BR-101. A área do projeto inclui cinco aterros próximos ao canal Goiana (Figura 1), cada um implementado com uma solução de engenharia distinta. O aterro 1 foi o único construído inteiramente de acordo com o projeto executivo original, envolvendo a substituição total de argila mole por areia, construção em etapas usando drenos verticais e inclusão de geogrelhas e uma camada de drenagem de areia. Os aterros 2 e 3 empregaram inicialmente blocos de EPS como preenchimento leve. Após uma falha causada por inundação em julho de 2011, projetos revisados foram desenvolvidos para ambos os aterros, mantendo o uso de EPS devido à sua relação custo-benefício e facilidade de instalação sem a necessidade de mão de obra especializada. Embora o EPS tenha sido inicialmente considerado para o Aterro 4, estudos hidrológicos subsequentes, que identificaram um novo nível máximo de inundação de 5,55 m, levaram à adoção de um aterro estruturado apoiado por estacas de aço (CS 300-109, Gerdau) dispostas em uma grade de 2,93 m × 3,06 m com blocos de cobertura. Finalmente, o Aterro 5 foi construído usando mistura de solo com cimento para formar colunas de solo-cimento. A proposta inicial de Jet Grouting pretendia formar um bloco monolítico, no entanto, testes de carga revelaram que as colunas funcionavam efetivamente apenas como elementos de solo reforçado. O projeto de cada aterro foi baseado em

investigações abrangentes de laboratório e de campo para garantir a compatibilidade com o perfil geotécnico local (Souza, 2012; Souza, 2018).

Dentre os trechos críticos identificados ao longo do projeto de duplicação da rodovia BR-101 em Pernambuco, o Aterro 3 foi selecionado para análise detalhada devido à sua complexidade geotécnica e localização estratégica adjacente a um encontro de ponte. Este trecho é sustentado por solos argilosos moles e altamente compressíveis, o que, em combinação com a proximidade de uma estrutura rígida, exigiu uma solução de engenharia capaz de minimizar as tensões verticais e horizontais transmitidas ao sistema de fundação. Além disso, restrições relacionadas ao risco de inundação, tempo de construção e acessibilidade limitada aumentaram ainda mais os desafios técnicos. O aterro foi executado em 2010 pelo Exército Brasileiro como parte de uma intervenção emergencial de infraestrutura, em condições que exigiram execução rápida e garantiram a segurança estrutural. Para tanto, a solução adotada foi a utilização de um material de aterro leve, poliestireno expandido (EPS), com o objetivo de reduzir as cargas aplicadas ao subleito mole e evitar recalques excessivos ou deslocamentos laterais próximos à ponte.

2 Referencial Teórico

Estudos de caso brasileiros, como a obra na BR-101/PE, validam a eficiência técnica do EPS. Souza (2012, 2018) demonstrou controle de recalques e aumento da estabilidade, enquanto Galdino et al. (2018) e Chagas et al. (2019) destacaram melhorias logísticas e redução de tensões transmitidas a estruturas adjacentes. Gonçalves e Guazzelli (2004) mostraram a viabilidade do EPS em encontros de pontes.

Apesar das vantagens, o EPS apresenta limitações técnicas. Sakamoto (2018) aponta preocupações com fluência, sensibilidade a hidrocarbonetos e comportamento sob cargas dinâmicas. Coutinho et al. (2010) reforçam a importância de seguir normas como a NBR 11682 (ABNT, 2009), para garantir a estabilidade global.

Essas considerações reforçam a necessidade de validação criteriosa do projeto, monitoramento de desempenho e avaliação de compatibilidade de materiais em aplicações geotécnicas.

3 Metodologia

A metodologia adotada neste estudo garante uma abordagem tecnicamente consistente e alinhada aos objetivos da pesquisa, que envolvem a análise da aplicabilidade do EPS em obras de infraestrutura em solos moles. Foi realizada uma revisão sistemática da literatura, incorporando trabalhos acadêmicos na área de engenharia geotécnica. Essa abordagem qualitativa se justifica pela necessidade de compreender, comparar e interpretar parâmetros geotécnicos, métodos construtivos e resultados obtidos em projetos que utilizam EPS no Brasil.

As fontes analisadas fornecem estudos de caso de aterros construídos em áreas críticas, como a BR-101 em Pernambuco. Os dados extraídos incluem resultados de ensaios de palhetas, ensaios de compressão simples em EPS, monitoramento de recalques, medições de tensões verticais, bem como custos e tempo de construção. As informações foram organizadas em tabelas e representações gráficas para permitir a comparação direta entre a solução com EPS e soluções tradicionais.

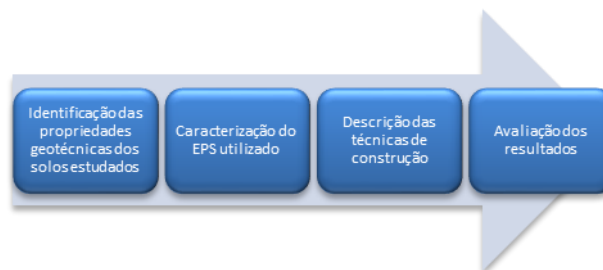


Figura 2 – Protocolo de extração de dados

A análise seguiu um protocolo de extração de dados em quatro etapas. Primeiramente, as propriedades geotécnicas dos solos estudados foram identificadas para compreender as condições do subsolo e sua influência no desempenho do aterro. Em segundo lugar, o poliestireno expandido (EPS) utilizado no projeto foi caracterizado, incluindo suas propriedades físicas e mecânicas relevantes para aplicações geotécnicas. Em terceiro lugar, as técnicas construtivas empregadas em campo foram descritas, destacando os procedimentos de execução e as especificações técnicas adotadas. Por fim, os resultados foram avaliados por meio de uma avaliação de desempenho da solução implementada, permitindo uma análise abrangente de sua eficácia e adequação às condições apresentadas.

Os parâmetros comparativos mais relevantes, como custo por metro linear, recalque máximo registrado, tempo de execução e fator de segurança, foram então sistematizados. Figuras e gráficos foram criados para ilustrar as vantagens e limitações técnicas do uso de EPS. Essa abordagem comparativa permite a compreensão de aspectos quantitativos e qualitativos relacionados à segurança, praticidade e sustentabilidade das soluções geotécnicas.

Esta análise metodológica permite uma avaliação crítica e fundamentada do desempenho do EPS em diferentes contextos de aplicação. A análise dos dados dos projetos serve de base para as discussões apresentadas nas seções seguintes, onde os resultados são analisados e interpretados considerando suas implicações para a prática da engenharia geotécnica no Brasil. A adoção de critérios objetivos para a seleção de referências garante a credibilidade das conclusões e reforça a importância da pesquisa científica como ferramenta de apoio à tomada de decisão em obras com solos moles.

4 Análise dos resultados e Discussões

4.1 Histórico da obra

No momento da enchente excepcional de 17 de julho de 2011, a construção da solução de aterro à base de EPS estava apenas parcialmente concluída, tendo atingido o estágio de laje de concreto armado. A figura abaixo ilustra uma seção transversal típica do Aterro 03, mostrando o arranjo e a estratificação dos materiais utilizados em sua construção.

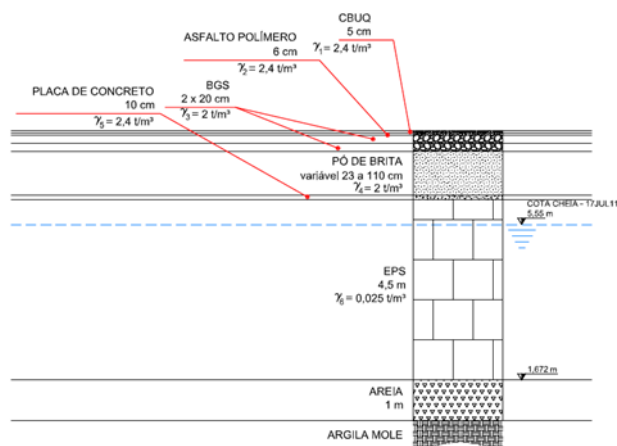


Figura 3 – Corte transversal do aterro 3 (Souza, 2018)

No projeto inicial, a cota máxima de inundação considerada era de 2.818 metros. No entanto, na data em questão, o nível de inundação atingiu 5,50 metros. Como resultado, devido a diversos fatores técnicos, o aterro de EPS no Aterro 03, que foi parcialmente construído na época, rompeu e desabou. As figuras abaixo ilustram o nível máximo de inundação e mostram a ruptura do Aterro 03.

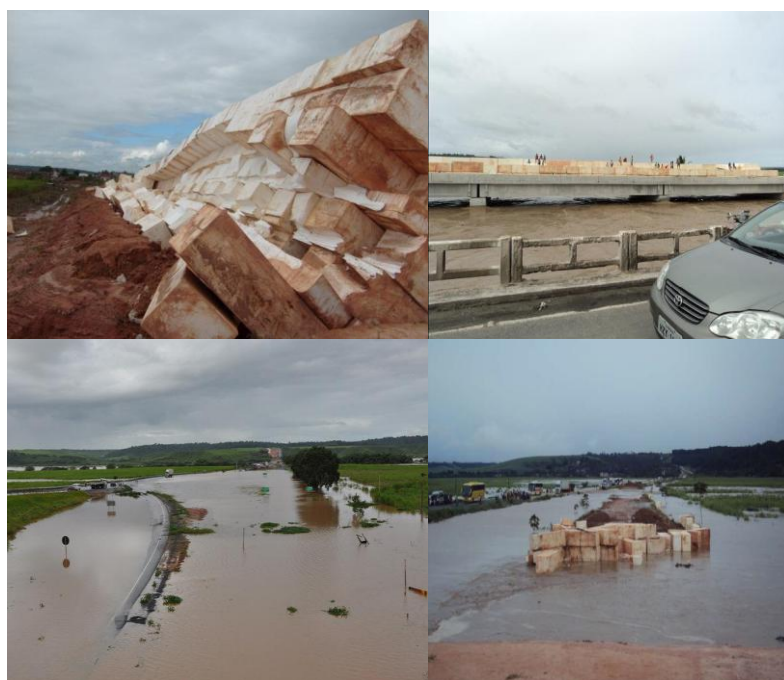


Figura 4 – Nível máximo de inundação e ruptura do aterro 03

Após a ruptura do aterro construído com material leve, o projeto do Aterro 3 foi revisado. No projeto original, a construção começou com uma camada de areia de 1,0 metro, atingindo a cota de 1,672 metros. Acima dela, foi colocada uma camada de aterro de EPS com espessura total de 4,5 metros. No projeto revisado, a espessura do aterro convencional (material de primeira categoria) foi aumentada, reduzindo assim a espessura da camada de EPS. A nova camada de EPS terá espessura de 2,0 metros.

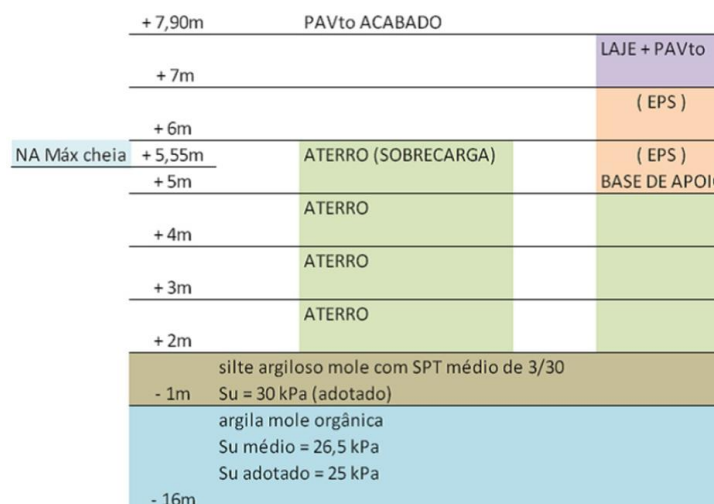


Figura 5 – Novo corte transversal do aterro 03 (Geoprojetos, 2012)

Considerando que o EPS deve suportar pelo menos 0,80 metros de pavimento e 0,10 metros de laje de concreto armado, a carga final de projeto, abrangendo o peso combinado do EPS, da laje de concreto e das camadas de pavimento, deve permanecer menor do que a carga inicialmente prevista no projeto original do aterro. Esse requisito garante que o aterro leve continue a reduzir efetivamente as tensões transmitidas aos solos moles subjacentes, evitando recalques excessivos ou instabilidade. No entanto, o projeto revisado propõe um aumento na espessura do aterro convencional, reduzindo simultaneamente a espessura da camada de EPS, alterando assim a distribuição de carga dentro da estrutura do aterro. Devido a essa alteração, torna-se necessário implementar uma sobrecarga temporária de 1,0 metro de material compactado sobre o aterro. Essa sobrecarga desempenha um papel crítico: acelera a consolidação e o recalque da fundação de solo mole, promovendo a estabilidade antes que a configuração final seja estabelecida. Após permitir tempo suficiente para que esses recalques ocorram, o excesso de material de sobrecarga é cuidadosamente removido até a elevação planejada para a instalação do EPS, garantindo que a carga final aplicada corresponda aos critérios de projeto. Essa abordagem de construção em etapas equilibra a necessidade de controle de assentamentos com os benefícios estruturais fornecidos pelo aterro leve de EPS, demonstrando uma solução de engenharia inteligente e adaptada às condições desafiadoras do solo.

4.2 Caracterização geotécnica

Os parâmetros de resistência adotados para a camada de solo mole foram baseados na média aritmética dos ensaios de cisalhamento com palhetas (Vane Tests) realizados no local. Entre as estacas 3349 e 3364, foram obtidos resultados em diferentes profundidades a partir de quatro ensaios, VT-3360-LD em 16/01/2009, VT-3360 em 21/06/2009, VT-3335 em 30/01/2008 e VT-3335 em 20/06/2009 (Moretti, 2012). Após a aplicação das correções propostas por Bjerrum e desconsiderando os resultados inconsistentes, foi possível estimar a resistência média ao cisalhamento não drenado da camada de solo mole. Os resultados obtidos nos ensaios foram plotados em um gráfico Su vs. Profundidade, mostrado abaixo.

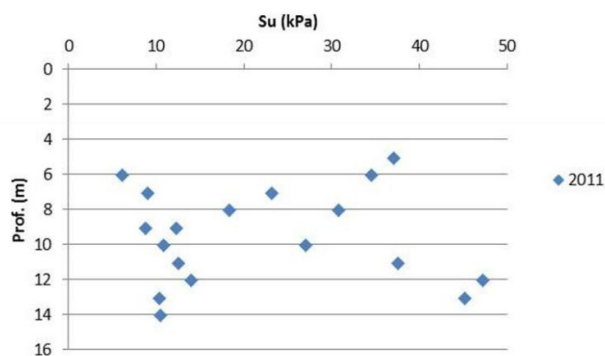


Figura 6 – Perfil de resistência ao cisalhamento não drenado (Geoprojetos, 2012)

A análise do gráfico forneceu informações cruciais que apoiaram a determinação dos parâmetros da camada de solo mole, que são essenciais para modelagem e projetos geotécnicos precisos. Entre os principais parâmetros identificados estava a resistência ao cisalhamento não drenada estimada (S_u), determinada em 26,5 kPa. Este valor reflete a resistência do solo a tensões de cisalhamento não drenado e é um fator crítico na avaliação das características de estabilidade e deformação do depósito de solo mole sob carga de aterro. Estimar S_u com precisão é fundamental para prever o comportamento de recalque e garantir a integridade estrutural do aterro ao longo de sua vida útil. Ao adotar este parâmetro, a equipe de engenharia foi capaz de simular respostas realistas do solo, orientando a escolha de materiais de preenchimento leves e a configuração geral do aterro. Esta calibração cuidadosa dos parâmetros do solo destaca a importância de integrar dados detalhados de investigação do solo na tomada de decisões de engenharia, particularmente em ambientes de solo mole desafiadores.

4.3 Avaliação da Estabilidade Global

As análises de estabilidade foram realizadas em termos de tensões totais, considerando superfícies de ruptura planas potenciais. O método de cálculo empregado nas análises foi o de Morgenstern-Price, baseado na Teoria do Equilíbrio Limite. Os parâmetros geotécnicos do solo adotados nas análises de estabilidade são apresentados na Tabela 1, tendo sido determinados com base em levantamentos SPT e ensaios de palhetas realizados.

Tabela 1 – Parâmetros geotécnicos adotados (Geoprojetos, 2012)

SOLO	S_u (kPa)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ (°)
ATERRO	-	18.0	-	10.0	27
ARGILA MOLE	30.0	-	15.0	-	-
SILTOSA	25 / 26.5	-	13.0	-	-

Os resultados dessas análises são apresentados nas Figuras 7 e 8 abaixo, fornecendo uma representação visual do comportamento geotécnico e da avaliação de estabilidade do aterro. O foco foi colocado exclusivamente na seção exibindo a maior altura do aterro, como mostrado na Figura 5, uma vez que esta representa a situação mais crítica e potencialmente vulnerável da estrutura. As avaliações foram conduzidas sob duas condições distintas: a condição de carga de sobrecarga, que simula o carregamento temporário aplicado durante a construção, e a condição de fim de construção, refletindo o estado final do aterro após todos

os materiais terem sido colocados e os recalques ocorridos. Ao se concentrar nessa seção crítica e nesses cenários de carregamento, a análise garante uma avaliação conservadora e robusta da estabilidade. Os Fatores de Segurança calculados para essas análises, que fornecem medidas quantitativas da resistência do aterro à falha, estão resumidos nas tabelas abaixo. Esses valores são instrumentais para verificar se o projeto atende aos padrões de segurança exigidos e pode suportar o carregamento esperado ao longo de sua vida útil.

Tabela 2 - Análise de estabilidade sob condição de sobrecarga (Geoprojetos, 2012)

ATERRO	ESTACA	ESPESSURA DO ATERRO (m)	ESPESSURA DA SOBRECARGA NO ATERRO (m)	FATOR DE SEGURANÇA
#3	3350+10	3.00	1.00	1.7

Tabela 3 - Análise de estabilidade na condição final da construção (Geoprojetos, 2012)

ATERRO	ESTACA	Espessura do Aterro (m)	Espessura do EPS (m)	Sobrecarga de Tráfego (kPa)	Fator de Segurança
#3	3350+10	3,00	2,00	20	1,4

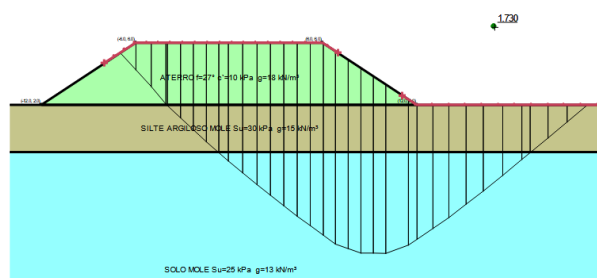


Figura 7 – Análise de estabilidade sob condição de sobrecarga (Geoprojetos, 2012)

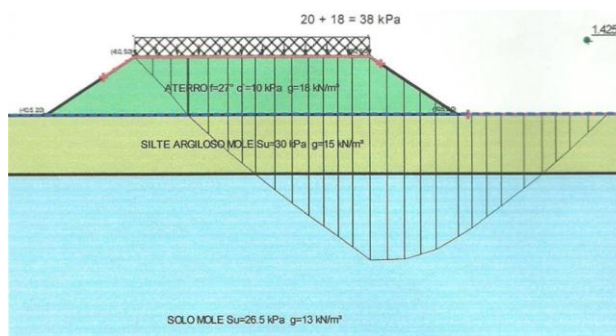


Figura 8 – Estabilidade ao final da construção (Geoprojetos, 2012)

A análise ao final da construção resultou em um fator de segurança (FS) de 1,4, que, embora ligeiramente abaixo do limite comumente aceito de 1,5, é considerado aceitável no contexto deste projeto. O parâmetro de resistência ao cisalhamento não drenado utilizado na análise foi estimado de forma conservadora com base em ensaios de cisalhamento de

palhetas in situ, sem incorporar ganhos de resistência provenientes da consolidação subsequente. Essa abordagem conservadora provavelmente subestima a resistência pós-construção, justificando, assim, o valor de FS observado. Comportamento semelhante foi relatado por Coutinho et al. (2010), que constataram que aterros de EPS construídos sobre solos moles mantiveram o desempenho a longo prazo mesmo com valores iniciais de FS próximos a 1,4.

4.4 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE CONTRA A PRESSÃO DE ELEVAÇÃO

Apenas o trecho com a maior altura de aterro (Figura 5), situação crítica para o aterro em questão, foi avaliado quanto às pressões hídricas por submersão, na condição de término da construção. Para tanto, adotou-se a cota máxima de inundação de 5,55 m, de acordo com a inundação excepcional ocorrida em 17 de julho de 2011. A tabela abaixo apresenta a cota mínima dos blocos de EPS e a cota máxima relatada.

Tabela 4 – Dados de elevação para avaliação da pressão de elevação

ATERRO Base dos Blocos (m)		Nível Máximo do Rio (m)
#3	5,00	5,55

De acordo com a tabela acima, deve-se avaliar a possibilidade de flutuação devido à submersão de 0,55 m de aterro com EPS.

O Fator de Segurança contra flutuação será igual a:

$$FS = \frac{T_{v1}}{T_{v2}} \geq 1,50$$

Onde:

T_{v1} – Tensão vertical descendente (peso dos materiais)

T_{v2} – vertical ascendente (poropressão da água)

Os pesos dos materiais e suas respectivas espessuras são:

Tabela 5 - Pesos dos materiais e suas respectivas espessuras

MATERIAIS	Espessura (m)	Peso Específico (t/m ³)
Brita graduada para pavimento	0,45	2,0
Aterro (solo)	0,35	1,8
Concreto	0,10	2,2
EPS	2,0	0,02

Tensão vertical descendente (T_{v1} – peso dos materiais acima do lençol freático):

$$T_{v1} = 0.45 \times 2.0 + 0.35 \times 1.8 + 0.1 \times 2.2 + 2.0 \times 0.02 = 1.79 \text{ t/m}^2$$

Logo,

$$FS = \frac{1.79}{0.55} = 3.254$$

Portanto, o Fator de Segurança é aceitável e não há risco de flutuação. No entanto, é importante observar que a geometria da solução pode levar ao acúmulo de água da chuva no interior dos aterros, o que pode resultar na formação de poropressão negativa adicional devido à infiltração. Para minimizar essa possibilidade, o projeto prevê a instalação de linhas de drenagem horizontais, utilizando geodrenos ou sistema similar, ao longo do aterro, conforme demonstrado nos desenhos de projeto.

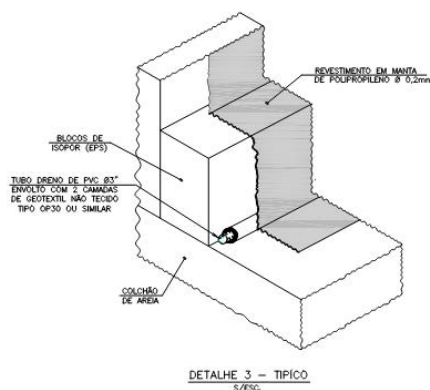


Figura 9 – Detalhe do geodreno (Geoprojetos, 2012)

4.5 Análise Comparativa de Soluções de Engenharia

Foi realizada uma comparação entre possíveis soluções de engenharia para o desenvolvimento de um projeto executivo após uma inundação, visando à estabilização e melhoria das fundações do Aterro 3. Com base nas características técnicas de cada solução, a Tabela 6 foi estruturada conforme Moretti (2010), apresentando as vantagens e desvantagens de cada alternativa.

Tabela 6 – Vantagens e Desvantagens de Cada Solução (Moretti, 2010)

MÉTODO	VANTAGENS	DESvantagens
COLUNAS DE PEDRA	1) Colunas permeáveis; 2) Fácil de executar; 3) Ganho na resistência não drenada do solo mole após a dissipação da pressão de poros.	1) Difícil prever a estabilidade em longo prazo; 2) Variabilidade no diâmetro das colunas; 3) Empolamento do solo mole durante a instalação; 4) Disponibilidade limitada de material na região.
COLUNAS DE AREIA COM GEOSSINTÉTICO	1) Colunas permeáveis; 2) Fácil de executar; 3) Ganho na resistência não drenada do solo mole após a dissipação da pressão de poros, devido ao confinamento da coluna pelo geossintético.	1) Limitação no diâmetro da coluna devido à geometria do geossintético; 2) Empolamento do solo mole durante a instalação; 3) Falta de experiência técnica no campo em relação ao desempenho das colunas.
COMPACTION GROUTING	1) Colunas permeáveis; 2) Técnica fácil de executar e não destrutiva; 3) Ganho na resistência não drenada do solo mole	1) Empolamento do solo mole durante a instalação; 2) Falta de experiência técnica no

MÉTODO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
COLUNAS DE SOLO-CIMENTO	após a dissipação da pressão de poros. 1) Maior número de empreiteiros disponíveis; 2) Disponibilidade de material; 3) Melhoria das propriedades geomecânicas do solo mole.	Brasil. 1) Falta de mão de obra especializada; 2) Alto consumo de cimento.
ATERRO COM EPS	1) Utilização de mão de obra convencional; 2) Menor tempo de execução em comparação com outros métodos; 3) Redução das tensões verticais induzidas pelo aterro.	1) O material de aterro existente deve ser removido; 2) Falta de experiência técnica no Brasil.

Os tipos de blocos de EPS utilizados nas atividades de construção ao longo da rodovia BR-101 foram categorizados em três formatos distintos, definidos de acordo com suas dimensões geométricas. Essa variação no dimensionamento dos blocos foi necessária para acomodar os requisitos geométricos e estruturais específicos de cada seção do aterro, garantindo a aplicação eficiente do material e a estabilidade geral do aterro. A seleção dos tipos de blocos baseou-se na otimização da distribuição espacial e na minimização de vazios durante a instalação. A Tabela 7 apresenta as dimensões dos blocos de EPS empregados no projeto.

Tabela 7 – Dimensões dos Blocos de EPS Utilizados na BR-101

Tipo de Bloco Dimensões (A × B × C) [m]	
Tipo A	1,25 × 1,00 × 4,00
Tipo B	1,25 × 0,50 × 4,00
Tipo C	1,00 × 0,625 × 4,00

Tabela 8 – Quantidade e Volumes dos Blocos de EPS Utilizados no Aterro 3

TIPO	Quantidade	VOLUME [m ³]
Tipo A	1000	5000
Tipo B	-	-
Tipo C	340	850
Volume Total	—	5850

As Tabelas 9 e 10 apresentam as especificações técnicas mínimas dos materiais utilizados na solução de aterro leve aplicada ao Aterro 3. A Tabela 9 resume as propriedades mecânicas e físicas dos blocos de poliestireno expandido (EPS), incluindo densidade, resistência à compressão e resistência à flexão e ao cisalhamento, com base em ensaios padronizados (Moretti, 2010). A Tabela 10 detalha as propriedades da geomembrana empregada como camada protetora e vedante sobre o EPS, incluindo comportamento à tração, resistência à perfuração e ao rasgo, teor de negro de fumo e resistência à ruptura, também de acordo com as normas ASTM relevantes (Moretti, 2010). Essas propriedades do material foram essenciais para garantir o desempenho em condições operacionais e ambientais no contexto de solo mole do projeto BR-101.

Tabela 9 – Características do EPS utilizado (Moretti, 2010)

PROPRIEDADE	NORMA DE ENSAIO	UNIDADE	TIPO 5
Densidade aparente nominal	NBR 11949	kg/m ³	22,5

PROPRIEDADE	NORMA DE ENSAIO	UNIDADE	TIPO 5
Densidade aparente mínima	NBR 11949	kg/m ³	20
Resistência à compressão a 10% de deformação	NBR 8082	kPa	110
Resistência mínima à flexão	ASTM C-203	kPa	220
Resistência mínima ao cisalhamento	EM-12090	kPa	110

Tabela 10 – Características da geomembrana utilizada (Moretti, 2010)

PROPRIEDADE	NORMA DE ENSAIO	UNIDADE	1,0 mm
Espessura	ASTM D1599	mm	nominal
Massa específica aparente mínima	ASTM D1505/D792	g/cm ³	0,94
Resistência à tração no escoamento (média mín.)	ASTM D6693 Tipo IV	kN/m	15
Alongamento no escoamento (média mín.)	ASTM D6693 Tipo IV	%	12
Resistência à tração na ruptura (média mín.)	ASTM D6693 Tipo IV	kN/m	27
Alongamento na ruptura (média mín.)	ASTM D6693 Tipo IV	%	700
Resistência mínima ao rasgo	ASTM D1004	N	125
Resistência mínima à perfuração	ASTM D4833	N	320
Teor de negro de fumo	ASTM D1603	%	2 a 3
Resistência à ruptura	ASTM D3786	kPa	150

Os dados de desempenho coletados de projetos de aterros baseados em EPS demonstraram claras vantagens em termos de estabilidade global e controle de recalques diferenciais. O baixo peso específico do EPS reduz significativamente as tensões verticais transmitidas aos solos de fundação moles, o que, por sua vez, diminui o recalque primário e melhora o desempenho estrutural em longo prazo das camadas do pavimento. Esse benefício é particularmente relevante para argilas orgânicas ou altamente compressíveis, como as encontradas no projeto BR-101. Essas descobertas são consistentes com as de Galdino et al. (2018) e Souza (2012), que relataram reduções de recalques superiores a 60% e notaram melhorias na estabilidade e na distribuição de carga. Portanto, o EPS surge como uma solução tecnicamente sólida para infraestrutura crítica construída sobre subleitos moles.

Um estudo de mercado foi realizado anteriormente em julho de 2010 por uma empresa contratada pelo DNIT, que identificou o aterro de EPS como a solução economicamente mais vantajosa.

Tabela 11 – ANÁLISE DE ESTABILIDADE GLOBAL (Moretti, 2010)

SOLUÇÃO	FATOR DE SEGURANÇA (FS)
Colunas de brita	1,47
Colunas de areia confinadas por geossintéticos	1,51
Injeção de calda (compaction grouting)	1,56
Colunas de brita graduada tratadas com cimento	1,52
Colunas de solo-cimento	1,49
Aterro com material leve	Foi verificado que as tensões existentes (14,2 kPa) estavam da mesma ordem de magnitude daquelas obtidas com o uso de EPS (14,1 kPa). Nenhum problema de flutuação foi observado para o nível máximo do lençol freático em um período

SOLUÇÃO	FATOR DE SEGURANÇA (FS)
	de retorno de 100 anos (elevação de 2,85 m).

Portanto, neste estudo, foi realizado um novo levantamento de preços utilizando como data de referência julho de 2025, com o objetivo de verificar se o aterro de EPS continua sendo a alternativa com melhor custo-benefício.

Tabela 12 – Comparação Geométrica e Geotécnica das Soluções (Moretti, 2010)

SOLUÇÃO	ESPAÇAMENTO TRIANGULAR (m)	DIÂMETRO DA COLUNA (m)	NÚMERO DE COLUNAS POR m ²	Relação Ac/Ae (%)
Colunas de areia	1,70	0,80	5,50	14
Colunas de brita	2,10	0,78	8,15	25
Injeção de calda (Compaction Grouting)	1,60	0,60	9,38	29
Colunas de solo-cimento	1,60	0,80	7,07	19
Colunas de brita graduada tratadas com cimento	1,60	0,50	7,86	7

A Tabela 12 apresenta uma avaliação comparativa de cinco soluções de melhoramento do solo com base em suas configurações geométricas e eficiência geotécnica. As soluções incluem colunas de areia, colunas de brita, compaction grouting, colunas de solo cimento e colunas de brita graduada tratadas com cimento.

Para estimar o custo de cada solução de engenharia, diversas condições de contorno foram estabelecidas para refletir com precisão as realidades logísticas e técnicas do segmento em análise. A distância do local de disposição foi fixada em 5 km, correspondendo às áreas adequadas mais próximas para receber o material escavado da seção experimental. O aterro de EPS foi projetado com espessura de laje de 10 cm e taxa de armadura de 50 kg/m³, ambos baseados no projeto executivo elaborado por Moretti em 2010. Além disso, a massa específica dos blocos de EPS foi considerada de 25 kg/m³, seguindo a mesma referência de projeto. As perdas na construção foram estimadas em 10% para compensar o desperdício de material durante a execução. O preço unitário do EPS inclui a entrega no canteiro de obras, identificada como a opção logisticamente mais viável para o Exército Brasileiro. Da mesma forma, o custo unitário da solução solo-cimento abrange a mobilização de equipamentos, a montagem do local, a mão de obra e o consumo de cimento, que também representam a abordagem logística preferencial para o Exército Brasileiro neste projeto. Com base nessas premissas, os valores na figura abaixo são apresentados por metro de seção para cada solução.

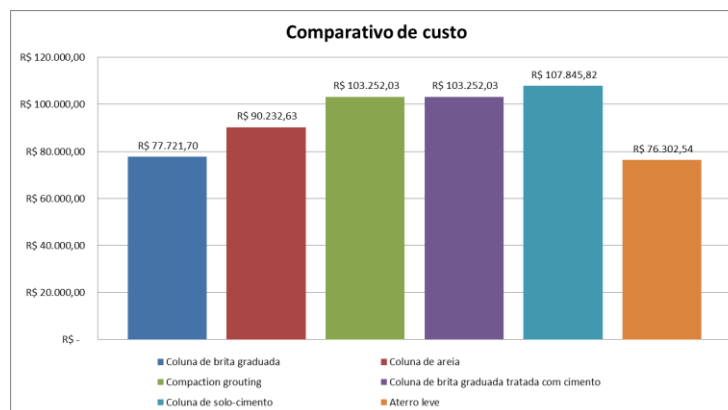


Figura 10 – Comparativo de custo das soluções

Em relação à avaliação das soluções apresentadas na figura 10, o levantamento de custos atualizado, que descreve os custos estimados das alternativas propostas para a estabilização do Aterro 3, confirma que o aterro leve com EPS continua sendo a opção economicamente mais vantajosa, mesmo após o evento de ruptura.

A análise da tabela 6 revela que a grande maioria dos métodos apresentados compartilha uma desvantagem comum, a falta de conhecimento técnico e experiência prática com sua implementação no Brasil. Embora o método da coluna de solo-cimento utilize cimento como principal insumo e exista um número significativo de empresas no mercado nacional capazes de fornecê-lo, essa técnica apresenta duas principais desvantagens: o alto consumo de cimento e a dificuldade de realizar um controle de qualidade eficaz. Para inspecionar adequadamente o processo construtivo, uma equipe deve monitorar a profundidade de perfuração em campo enquanto outra equipe verifica simultaneamente o consumo de cimento na central de concreto, tornando a supervisão mais complexa e intensiva em recursos.

Em contrapartida, a técnica de aterro de EPS, além de oferecer vantagens de custo em relação às demais soluções, apresenta apenas uma desvantagem relevante observada na Tabela 6, a necessidade de remoção do aterro existente. No entanto, essa não é uma questão significativa para o Exército Brasileiro, visto que há disponibilidade suficiente de escavadeiras hidráulicas e caminhões basculantes para realizar essa tarefa com eficiência. Outro fator-chave que influencia a viabilidade dos métodos listados na Tabela 6 é a disponibilidade de mão de obra. A solução de aterro de EPS depende de mão de obra convencional, prontamente disponível no Exército Brasileiro. Com uma equipe de 30 soldados e um sargento supervisor, é possível atingir uma taxa diária de instalação de até 130 m³ de EPS. Isso resulta em um tempo de execução menor em comparação aos demais métodos, além de utilizar mão de obra não especializada, ou seja, trabalhadores que não necessitam de treinamento técnico prévio para executar o serviço.

Além disso, a rápida instalação, o fácil transporte dos blocos e a ausência de compactação intensiva contribuíram para a otimização do cronograma, reduzindo custos indiretos e minimizando atrasos no projeto. Essas descobertas confirmam a eficiência do EPS tanto no desempenho estrutural quanto na logística da construção. Com base nas evidências apresentadas, pode-se afirmar que o uso de EPS em aterros sobre solos moles é uma solução tecnicamente robusta, desde que acompanhada de planejamento adequado e avaliação de compatibilidade com as condições do solo local. A análise comparativa de indicadores

geotécnicos e construtivos confirma que o EPS não apenas cumpre seu papel estrutural, mas também diversifica as possibilidades de intervenções possíveis em locais anteriormente inviáveis devido a restrições técnicas ou econômicas.

5 Conclusões/Considerações Finais

O uso de poliestireno expandido (EPS) como material alternativo em aterros sobre solos moles demonstrou ser uma solução técnica, econômica e ambientalmente viável. Os dados apresentados neste estudo indicam que o EPS reduz efetivamente a carga em subleitos de baixa resistência, limita significativamente os recalques e melhora a estabilidade geral do sistema. Além disso, o processo construtivo é simplificado e rápido, tornando o EPS uma alternativa vantajosa em comparação aos métodos convencionais. Essa abordagem atende às demandas da engenharia moderna, que busca aliar desempenho estrutural à eficiência de recursos e à redução do impacto ambiental.

Estudos de caso como o da BR-101 em Goiana (PE) demonstraram benefícios concretos com a aplicação do EPS. Reduções de recalques superiores a 60%, economia global de custos de até 20% e tempos de execução reduzidos pela metade foram registrados em comparação com soluções convencionais (Souza, 2018). O EPS também demonstrou boa compatibilidade com diversos tipos de solos moles e foi aplicável mesmo em áreas críticas com presença de água ou deslocamentos diferenciados. Outro aspecto positivo foi seu desempenho ambiental, visto que o EPS é reciclável, inerte e contribui para a redução da extração de recursos naturais utilizados em aterros tradicionais.

Apesar desses benefícios, a aplicação do EPS requer cuidados específicos em relação à concepção e execução do projeto. A ausência de normas técnicas brasileiras detalhadas sobre o uso do EPS impõe maior responsabilidade ao engenheiro projetista, que deve possuir conhecimento técnico adequado. Aspectos como resistência ao fogo, resistência a agentes biológicos e estabilidade química devem ser devidamente considerados. Além disso, a formação de mão de obra qualificada e o incentivo à pesquisa aplicada são passos fundamentais para a adoção em larga escala dessa tecnologia no Brasil. A experiência nacional ainda é recente, mas promissora, principalmente quando associada a boas práticas de desenvolvimento, supervisão e instrumentação de projetos.

Devido ao seu baixo peso específico, o EPS é inerentemente vulnerável a forças de flutuação, especialmente em zonas propensas a inundações. A ruptura do Aterro 3 esteve diretamente relacionada a um evento de inundação excepcional, que excedeu os níveis de inundação de projeto em mais de 2,5 metros. Isso destaca a importância crucial da adoção de medidas antifulutuação robustas, como camadas de lastro, sistemas de ancoragem ou programação da construção durante períodos de seca, no projeto de aterros de EPS. Essa consideração é especialmente relevante em regiões tropicais com padrões de precipitação imprevisíveis e ressalta a necessidade de critérios de projeto hidráulico conservadores ao empregar materiais ultraleves.

Com base nos resultados deste estudo e na análise de casos brasileiros, as seguintes recomendações são propostas para garantir a implementação eficaz e segura de EPS em aterros de solo mole.

O conjunto de recomendações aqui referenciado abrange diretrizes estratégicas que visam aprimorar o desempenho técnico, operacional e ambiental de soluções baseadas em

EPS em engenharia geotécnica. Essas diretrizes defendem o desenvolvimento e a institucionalização de diretrizes nacionais padronizadas de projeto, com ênfase na resistência a pressões de elevação, critérios de desempenho em situações de incêndio e durabilidade do material a longo prazo. Em cenários caracterizados por altos níveis de água subterrânea ou suscetibilidade à inundação, recomenda-se a incorporação de camadas de lastro ou mecanismos de ancoragem, como geogrelhas ou microestacas, para garantir a estabilidade e o confinamento dos blocos de EPS, mitigando, assim, os riscos de flotação.

Além disso, a implementação de sistemas abrangentes de monitoramento geotécnico, incluindo placas de recalque, piezômetros e inclinômetros, é essencial para a avaliação precisa do comportamento do aterro, tanto durante a fase de construção quanto ao longo de sua vida útil. Em relação à logística da construção, recomenda-se que a instalação de EPS seja programada durante períodos climáticos secos para reduzir a probabilidade de deslocamento induzido por inundações ou comprometimento estrutural, particularmente em regiões com acentuada variabilidade sazonal de precipitação.

Paralelamente a essas medidas de engenharia, as recomendações ressaltam o papel fundamental das iniciativas de capacitação profissional e da disseminação sistemática de estudos de caso bem-sucedidos como mecanismos para consolidar a expertise técnica e promover uma aceitação institucional mais ampla das tecnologias de EPS em estruturas de desenvolvimento de infraestrutura. Além disso, a avaliação de indicadores de desempenho ambiental, por meio de análises comparativas com materiais de aterro convencionais, é vital para subsidiar a tomada de decisões baseadas em evidências, alinhadas aos objetivos de infraestrutura sustentável.

O EPS constitui uma solução tecnicamente viável e sustentável para a construção de aterros em solos moles, demonstrando benefícios substanciais em termos de controle de recalques, tempo de execução e redução de custos. Sua aplicação bem-sucedida em projetos nacionais de infraestrutura reforça seu potencial para implementação mais ampla, condicionada a projetos de engenharia adequados e desenvolvimento regulatório. Seu uso pode ser estrategicamente incorporado ao portfólio de soluções geotécnicas, desde que seja apoiado por estudos técnicos, simulações numéricas, monitoramento de campo e padronização progressiva. Pesquisas contínuas e ampla disseminação do conhecimento são etapas essenciais para que o EPS se torne uma solução de referência em projetos de infraestrutura sustentáveis e resilientes no Brasil.

6 Referências

ALMEIDA, M. S. S.; MARQUES, M. E. S. Soluções de engenharia para solos moles. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BJERRUM, L.; SIMONS, N. Empirical correlation in soil mechanics. *Géotechnique*, v. 10, n. 2, p. 83–91, 1960. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1960.10.2.83>.

CHAGAS, A. M.; SILVA, G. B.; RIBEIRO, T. M. Um estudo sobre a utilização de EPS para aterro sobre solos moles. *Cadernos de Graduação – Ciências Exatas*, v. 5, n. 2, p. 329–338, 2019.

COUTINHO, R. Q.; LACERDA, W. A.; ALBUQUERQUE, P. J. R. Estabilidade de aterros em solos moles. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG), 16., 2010, Porto de Galinhas, PE. Anais [...]. Porto de Galinhas, PE: ABMS, 2010.

DUARTE, A. G.; BARBOSA, F. F. B.; SILVA, G. L. Técnicas de melhoria de solos moles. Revista Geotecnia, n. 145, p. 111–126, 2016.

DUSKOV, M. Stress-strain behavior of EPS. Geosynthetics International, v. 4, n. 6, p. 623–635, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1680/gein.1997.4.6.623>.

GALDINO, L. R. N.; SANTOS, G. C.; MORAIS, D. A. A utilização do EPS como aterro ultraleve. Cadernos de Graduação – Ciências Exatas, v. 5, n. 1, p. 197–204, 2018.

GONÇALVES, H.; GUAZZELLI, P. Aplicação de EPS em encontros de pontes. Revista Técnica, n. 106, p. 78–82, 2004.

MORETTI, A. Utilização de EPS em obras geotécnicas. São Paulo: ABRAPEX, 2010.

MORETTI ENGENHARIA CONSULTIVA. Estudo de alternativas de soluções técnicas para o Aterro 03. São Paulo, 2010.

MORETTI ENGENHARIA CONSULTIVA. Memorial descritivo: Utilização de aterro leve com poliestireno expandido (EPS) no Aterro 3. São Paulo, 2010.

MORETTI ENGENHARIA CONSULTIVA. Relatórios de leituras de instrumentação geotécnica. São Paulo, 2007.

SAKAMOTO, M. Y. Solução geotécnica com utilização de EPS em aterros sobre solo mole. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

SKEMPTON, A. W.; NORTHEY, R. D. Sensitivity of clays. Géotechnique, v. 3, n. 1, p. 30–53, 1952. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1952.3.1.30>.

SOUZA, F. Q. de. Avaliação da aplicabilidade de poliestireno expandido (EPS) em aterro sobre solos moles em obra de duplicação da BR-101. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

SOUZA, F. Q. de. Estudo das propriedades geotécnicas e comportamentos dos aterros sobre solos moles da BR-101 / Goiana-PE. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Projeto executivo para adequação da capacidade da Rodovia BR-101/PE (Corredor Nordeste). Brasília, DF, 2004.

GEOPROJETOS. Projeto executivo para adequação da capacidade da Rodovia BR-101/PE (Corredor Nordeste). Recife, 2012.