

CENTRO UNIVERSITARIO UNIFAAT
ENGENHARIA CIVIL

Bárbara Fonseca
Jennifer Ianelli
Matheus Henrique
Thaís Delprat
Victor Verzemiuzzi

Utilização de EPS em aterro sobre solo mole

ATIBAIA - SP
2019

Bárbara Fonseca
Jennifer Ianelli
Matheus Henrique
Thaís Delprat
Victor Verzemiuzzi

Utilização de EPS em aterro sobre solo mole

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Centro Universitário
UNIFAAT, para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Ribamar de Jesus
Gomes.

ATIBAIA - SP
2019

AGRADECIMENTO

Primeiramente, a Deus, obrigado por nos mostrar que tudo é passageiro e que com fé alcançamos sonhos grandiosos. Às nossas famílias, agradecemos por confiar em nosso potencial e nos apoiar durante todas as escolhas tomadas, por todo amor e compreensão nos momentos difíceis e pelos ensinamentos que levaremos para vida toda. A todos os nossos amigos, obrigado pelo companheirismo e disponibilidade para nos auxiliar nos estudos e em tantos momentos. Ao orientador Prof. Ribamar de Jesus Gomes que teve papel fundamental na elaboração deste trabalho. Agradecemos a todos os mestres e professores do curso de Engenharia Civil pelos ensinamentos ao longo dessa jornada.

RESUMO

Considerando o âmbito problemático referente a utilização de solos moles na questão geotécnica, diferentes métodos construtivos vêm sendo desenvolvidos. Visto que a magnitude dos recalques em aterros sobre solos moles está ligada diretamente ao acréscimo de tensão vertical causado pela sua construção, a utilização de materiais leves é uma alternativa que deve ser considerada. O método apresentado e estudado no decorrer deste trabalho trata-se da utilização do EPS – poliestireno expandido - em aterros de solo mole. No Brasil, o poliestireno expandido já apresentou utilização em alguns aterros rodoviários. Segundo estudos apresentados neste trabalho, a utilização de EPS constitui uma ótima solução para aterros em áreas em que o solo apresenta baixa capacidade de carga, ou seja, solos compressíveis. O EPS, poliestireno expandido, é um material plástico celular que pode ser encontrado em diversas formas geométricas, apresentando utilização em variadas aplicações, seja na construção civil, na indústria automotiva ou em embalagens diversas. No decorrer deste trabalho são vistos os conceitos referentes a aterros convencionais – suas diversas formas e soluções - e aterros com a utilização de EPS. São apresentados os condizentes cálculos envolvendo projetos de aterros, sendo possível assim traçar a comparação necessária para a sustentação do argumento desta pesquisa. É visto, através dos cálculos e pesquisas, que a utilização do EPS em aterros de solo mole apresenta superioridade em relação ao aterro convencional, pois apresenta execução simples, possuindo vantagens em relação ao recalque do solo e conseqüentemente na relação custo-benefício.

Palavras-chave: Aterros. Solo mole. EPS. Comparação.

ABSTRACT

Considering the problematic scope regarding the use of soft soils in the geotechnical question, different construction methods have been developed. Since the magnitude of embankment settlements on soft soils is directly linked to the increased vertical stress caused by their construction, the use of lightweight materials is an alternative that should be considered. The method presented and studied during this work is the use of EPS - expanded polystyrene - in soft soil embankments. In Brazil, expanded polystyrene has already been used in some embankment. According to studies presented in this work, the use of EPS is a great solution for embankments in areas where the soil has low load capacity, compressible soils. EPS, expanded polystyrene, is a cellular plastic material that can be found in a variety of geometric shapes, and can be used in a variety of applications, whether in construction, automotive industry or packaging. In the course of this work, concepts regarding conventional embankments - their various forms and solutions - and embankments using EPS are seen. The appropriate calculations involving embankment projects are presented, making it possible to draw the necessary comparison to support the argument of this research. It is seen, through calculations and research, that the use of EPS in soft soil embankments is superior to the conventional embankment, since it has a simple implementation, having advantages over soil repression and, consequently, the cost-benefit ratio.

Keyword: Embankment. Soft soil. EPS. Comparison.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação de construção de uma obra de aterro	15
Figura 2: 1º Estágio - Máxima Transgressão Cananeia (Pleistoceno)	17
Figura 3: 2º estágio: Regressão e formação de cordões de areia.....	17
Figura 4: 3º estágio: Erosão parcial dos sedimentos marinhos.....	18
Figura 5: 4º estágio: Máximo de Transgressão Santos (Holoceno)	18
Figura 6: 5º estágio: Regressão em direção ao N.M. atual	18
Figura 7: Aterro sobre solo mole	19
Figura 8: Equipamento para o ensaio de palheta.....	21
Figura 9: Aterro sobre estacas	23
Figura 10: Aterro Leve (EPS)	23
Figura 11: Aterro leve com EPS.....	24
Figura 12: Aterro com berma.....	24
Figura 13: Aterro com sobrecarga temporária.....	25
Figura 14: Aterro por partes	26
Figura 15: Aterro com geossintéticos	26
Figura 16: Gráfico Comparativo das técnicas supracitadas	27
Figura 17: Esquema carbono e hidrogênio	28
Figura 18: Esquema carbono e hidrogênio II	28
Figura 19: Aterro com blocos de EPS	29
Figura 20: Curva de compressibilidade	33
Figura 21: Gráfico da compressibilidade	33
Figura 22: Utilização de blocos de EPS	34
Figura 23: Correlações obtidas com a massa específica do EPS	36
Figura 24: Gráfico versus deformação para compressão uniaxial de blocos de EPS	37
Figura 25: Envoltórias de resistência de amostras de EPS.....	38
Figura 26: Valores do módulo de elasticidade na fase elástica.....	38
Figura 27: Componentes principais para construção de aterro com EPS.....	40
Figura 28: Fluxograma de verificações de um projeto de aterro com EPS.....	41
Figura 29: Modos de ruptura para aterros sobre solos moles	43

Figura 30: Fatores de segurança	43
Figura 31: Ábaco para cálculo de altura crítica de aterros	44
Figura 32: Ábaco para cálculo das dimensões da berma de equilíbrio	45
Figura 33: Gráfico comparativo - Aluvião 4,5m	55
Figura 34: Gráfico comparativo - Aluvião 5m	55
Figura 35: Gráfico comparativo - Aluvião 6m	56
Figura 36: Gráfico comparativo - Aluvião 7m	56
Figura 37: Gráfico comparativo - Aluvião 8m	57
Figura 38: Valores comparativos de custo por m ³	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatísticas de todos os ensaios de compressão uniaxial	36
Tabela 2 – Tensões efetivas do solo	49
Tabela 3 – Tensão do aterro para 4,5m de aluvião	50
Tabela 4 – Tensão do aterro para 5m de aluvião	50
Tabela 5 – Tensão do aterro para 6m de aluvião	51
Tabela 6 – Tensão do aterro para 7m de aluvião	51
Tabela 7 – Tensão do aterro para 8m de aluvião	52
Tabela 8 - Recalque para 4,5m de aluvião – Aterro Convencional e com EPS	52
Tabela 9 - Recalque para 5m de aluvião – Aterro Convencional e com EPS	53
Tabela 10 - Recalque para 6m de aluvião – Aterro Convencional e com EPS	53
Tabela 11 - Recalque para 7m de aluvião – Aterro Convencional e com EPS	54
Tabela 12 - Recalque para 8m de aluvião – Aterro Convencional e com EPS	54

LISTA DE ABREVIATURAS

EPS	Expanded Polystyrene (Poliestireno Expandido)
NBR	Norma Brasileira
SPT	Standard Penetration Test (Teste Padrão de Penetração)
TF	Tonelada Força
PS	Poliestireno Expandido
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
kPa	Unidade de pressão quilopascal

LISTA DE SÍMBOLOS

σ – Tensão normal em kPa

– Recalque elástico em metros

SUMÁRIO

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.3 METODOLOGIA	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 SOLO MOLE (SOLO SATURADO COMPRESSÍVEL).....	16
2.1.1 Solo de Origem Fluvial	16
2.1.2 Solo de Origem Marinha.....	16
2.2 ATERRO DE SOLO MOLE	19
2.3 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS.....	20
2.4 ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO.....	22
2.4.1 Substituição do solo mole.....	22
2.4.2 Aterros estruturados (estaqueado).....	22
2.4.3 Aterros Leves (EPS).....	23
2.4.4 Aterros com bermas de equilíbrio.....	24
2.4.5 Pré-carregamento ou sobrecarga temporária e auxílio de Geogrenos.....	24
2.4.6 Construção por Etapas.....	25
2.4.7 Aterros reforçados com geossintéticos.....	26
2.4.8 Comparativo	27
2.5 POLIESTIRENO EXPANDIDO.....	27
2.5.1 Material.....	29
2.6 DEFINIÇÃO DE TENSÃO.....	31
2.7 RECALQUE	31
2.7.1 Recalque elástico	32

2.7.2	Recalque por adensamento.....	32
2.7.3	Compressão secundária.....	33
3.	DESENVOLVIMENTO.....	34
3.1	ATERROS LEVES	34
3.1.1	ATERROS LEVES COM EPS	34
3.1.2	O MATERIAL.....	35
3.1.3	TENSÃO <i>versus</i> DEFORMAÇÃO.....	37
3.1.4	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	37
3.1.5	PARÂMETROS ELÁSTICOS	38
3.1.6	PROCESSO CONSTRUTIVO	38
3.1.7	VERIFICAÇÕES EXTERNAS E INTERNAS	40
3.2	ATERRO CONVENCIONAL.....	42
3.2.1	BERMAS DE EQUILÍBRIO	44
3.2.2	ADENSAMENTO DE SOLO MOLE	46
4.	ANÁLISE COMPARATIVA: ATERRO COM EPS <i>versus</i> ATERRO CONVENCIONAL	48
4.1	PARÂMETROS.....	48
4.2	ATERRO CONVENCIONAL <i>versus</i> ATERRO COM EPS.....	48
5.	CONCLUSÃO.....	59
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1. INTRODUÇÃO

Segundo Marangon (2009), aterrar um terreno consiste em nivelar o mesmo, garantindo a necessária compactação do solo para a base de sua determinada construção.

De acordo com Maccarini (2013), EPS é uma abreviação para Poliestireno Expandido ou Expanded PolyStyrene. Consiste em um material celular plástico composto de pequenas partículas esféricas, contendo 98% de ar em sua estrutura. Este material já é usado na construção civil comumente para isolamento térmico e acústico e preenchimento de lajes treliçadas. Contudo, em 1972, foi utilizado pela primeira vez, na Noruega, para a construção de aterro rodoviário, sobre solos saturados.

1.1 JUSTIFICATIVA

O mercado da construção civil, devido à novas tecnologias, passa constantemente por atualizações e melhorias de suas matérias primas e técnicas de execução, a fim de se facilitar o trabalho, diminuir gastos e otimizar o tempo. Embasadas nas necessidades desta indústria, vêm crescendo a utilização e aprimoramento de técnicas, como o uso do poliestireno expandido em diversos setores.

O termo solo mole se refere a solos saturados que são compostos principalmente por argila. Caracterizam-se por baixo atrito, apresentam baixa resistência ao cisalhamento e alta compressibilidade. Estes fatores contribuem para uma atuação pouco resistente nos aterros construídos com estes materiais, facilitando os recalques diferenciais e deslocamentos horizontais da estrutura.

Por conter um baixo peso específico o EPS reduz a sobrecarga no solo, tornando assim, as deformações próximas ao desprezível. Sendo assim, para efeitos desta pesquisa, adotou-se o termo solo mole se referindo aos solos saturados compressíveis. Portanto, esta pesquisa visa analisar por meio de cálculos, a viabilidade do uso deste material para construção de aterros sobre solo mole.

1.2 OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade do uso do EPS em aterro sobre solo mole. Dessa forma, analisar o método e seu desempenho juntamente com sua funcionalidade. Para realizar este estudo e assim atingir o objetivo principal do trabalho, foram seguidas as seguintes análises:

- I. Avaliar o uso de blocos de EPS como solução para um aterro sobre solo mole;
- II. Avaliar e determinar os recalques gerados pelo aterro de EPS;
- III. Analisar o deslocamento horizontal gerado pelo aterro;
- IV. Analisar e determinar as vantagens e desvantagens quanto ao uso.

1.3 METODOLOGIA

Este trabalho apresenta sua metodologia por meio de pesquisas acerca do material em questão, o EPS, bem como sua definição e utilização. Apresenta, também, material teórico que possibilita o entendimento das construções de Aterros, sejam eles convencionais ou com a utilização do poliestireno expandido, focando em suas características construtivas e de projetos.

Para o devido desenvolvimento da pesquisa, foram citadas diversas normas brasileiras – NBR's -, a fim de proporcionar o entendimento das questões envolvendo a engenharia de Aterros, com o referente embasamento teórico legislativo.

Tendo como objetivo deste trabalho de conclusão de curso a análise da utilização de blocos de EPS na construção de aterros de solo mole, foram apresentados cálculos referentes a tensões no solo e respectivos recalques, para aterros convencionais e aterros com a utilização do poliestireno expandido. Através desses cálculos, foram apresentadas tabelas de valores para diferentes tipos de espessura do solo e diferentes alturas de aterro, proporcionando assim uma gama de resultados que proporciona uma análise de maior precisão. Foram utilizados, também, gráficos representando os valores encontrados, possibilitando uma análise visual comparativa de valores, fator de suma importância para a conclusão do tema apresentado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

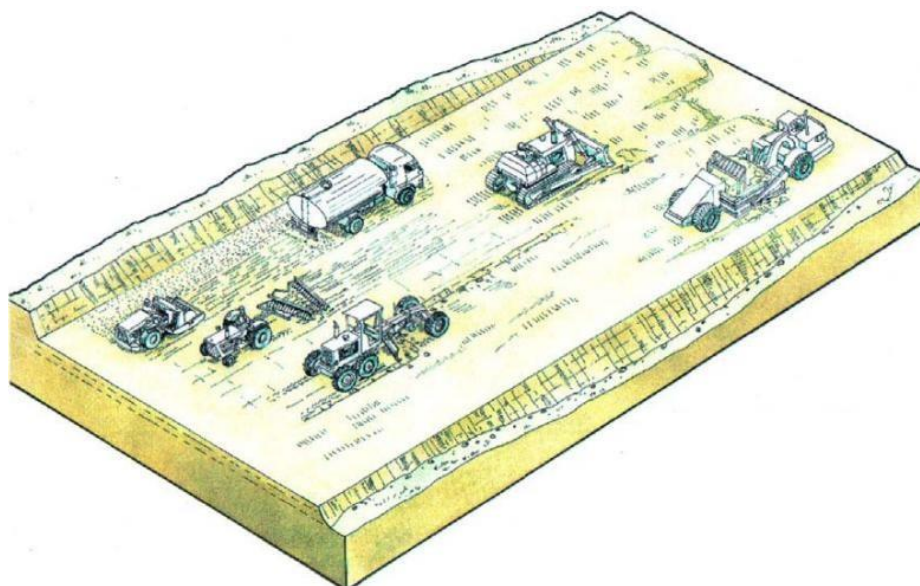
Na grande maioria das vezes, um terreno não está em perfeitas condições de elevações e desníveis, tornando impossível o início da construção e o cumprimento das regras da engenharia civil. Para sanar este problema, é realizado o aterro de terreno (figura 1).

O termo aterro, utilizado no segmento de terraplenagem, refere-se ao local onde são depositadas porções de terra ou entulho com objetivos diversos, sendo o mais comum, tornar plano um terreno originalmente em declive (queda ou caída) ou com depressão (buraco, valeta, rebaixo, etc).

Alguns passos comumente observados na construção de um aterro simples:

- I. Lançamento do material de escolha;
- II. Acerto do material com a utilização de trator de esteira;
- III. Acerto da superfície a ser compactada;
- IV. Umedecimento do material (eventual);
- V. Compactação final do aterro.

Figura 1: Representação de construção de uma obra de aterro.



Fonte: Marangon (2009)

2.1 SOLO MOLE (SOLO SATURADO COMPRESSÍVEL)

O comportamento de um solo depende da quantidade relativa de cada uma das três fases (sólidos, água e ar). Entende-se por solo mole ou solo muito mole, um solo de origem sedimentar. Segundo a NBR 7250:1982 - Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos -, solos moles são predominantemente argilosos e com valor do SPT (Standard Penetration Test ou Teste Padrão de Penetração) até 5. São, em geral, argilas moles ou areias argilosas fofas de deposição recente, isto é, formadas durante o Quaternário.

Solos moles possuem abundância de matéria orgânica em sua composição, que tem origens variáveis, distinguidos quer por seu processo ou local de deposição (fluvial ou marinho). Esses depósitos contêm predominância de partículas siltosas ou argilosas (o que lhes confere baixa condutividade hidráulica).

2.1.1 Solo de Origem Fluvial

De acordo com Massad (2010), os solos moles de origem fluvial ocorrem nas planícies de inundação ou várzea de rio, ou seja, regiões alagadas. O processo ocorre por deposição de sedimentos, formando camadas. Quando as camadas de argila intercalam com camadas de areias finas formam um perfil heterogêneo, caso contrário, é chamado de perfil homogêneo.

2.1.2 Solo de Origem Marinha

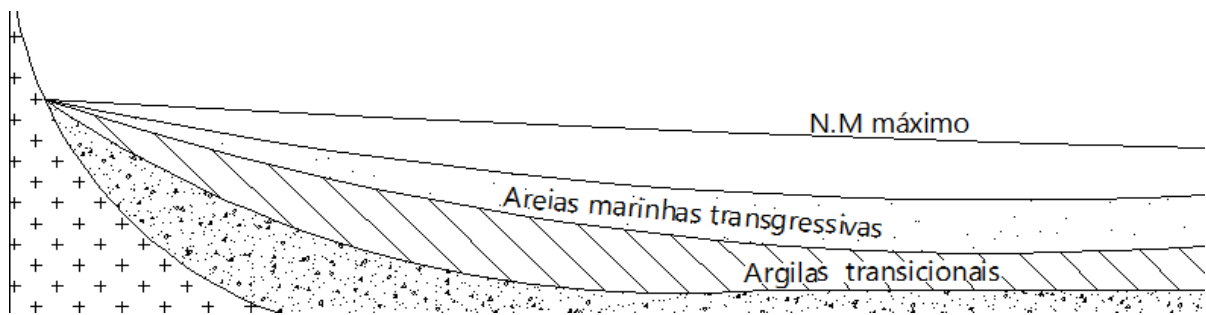
De acordo com Massad (2010), os solos de origem marinha foram formados no litoral brasileiro através de dois ciclos de sedimentação, no período Quaternário. Sendo eles:

- I. Pleistoceno (120.000 anos)
 - i. Nível marinho: $+8\text{m} \pm 2\text{ m}$
 - ii. Transgressão Cananéia
 - iii. Em geral, são fortemente sobreadensados (devido ao abaixamento do nível do mar, em 130 m, há 15.000 anos).
- II. Holoceno (7000 anos)
 - i. Nível marinho: $+ 4\text{m} \pm 2\text{ m}$
 - ii. Transgressão Santos

- iii. Solos levemente pré-adensados (com pressão de pré-adensamento muito pequena).

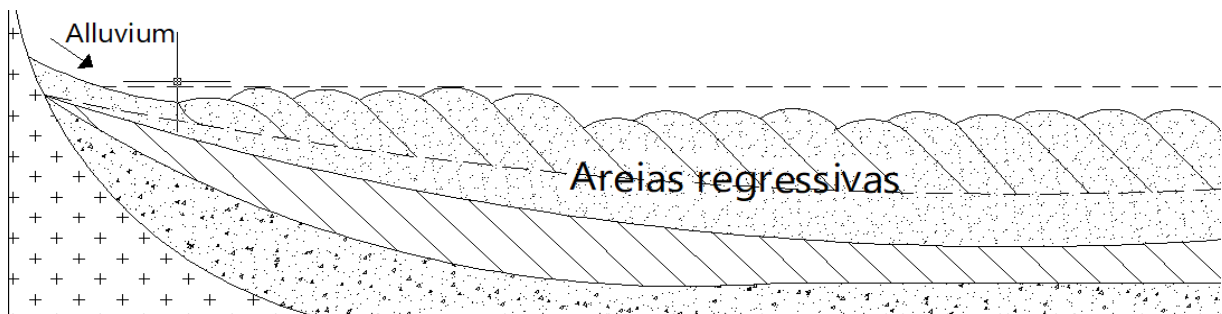
Ainda segundo Massad (2010), após o Holoceno, o mar entrou em um processo contínuo e lento de transgressão, interrompido por rápidas oscilações negativas de seu nível. O conhecimento dessas oscilações negativas é importante sob o ponto de vista geotécnico, pois pode justificar o leve pré-adensamento observado em algumas camadas superficiais desse tipo de solo. As figuras 2, 3, 4, 5 e 6 representam os variados estágios do solo.

Figura 2: 1º Estágio - Máxima Transgressão Cananeia (Pleistoceno)



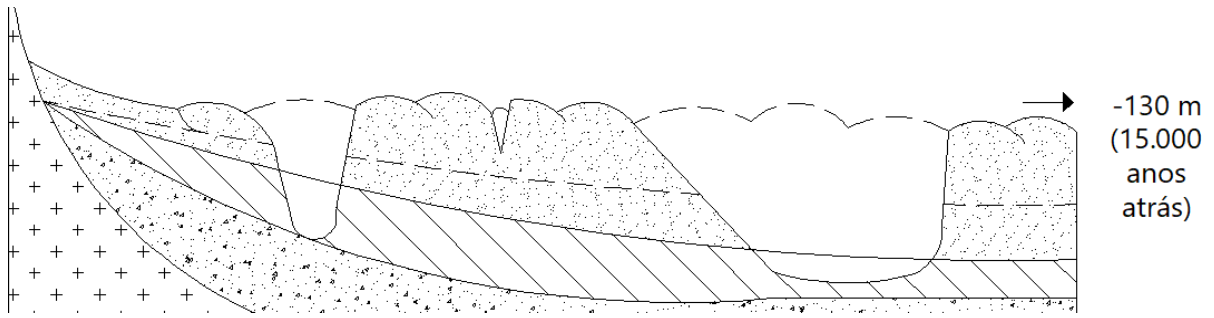
Fonte: Adaptado MASSAD (2010)

Figura 3: 2º estágio: Regressão e formação de cordões de areia



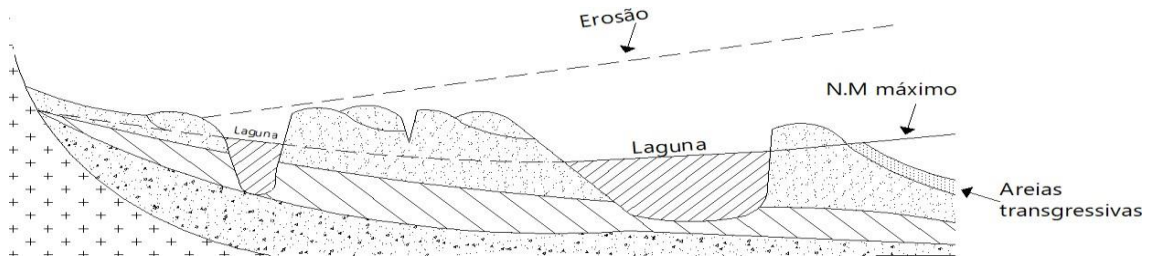
Fonte: Adaptado MASSAD (2010)

Figura 4: 3º estágio: Erosão parcial dos sedimentos marinhos



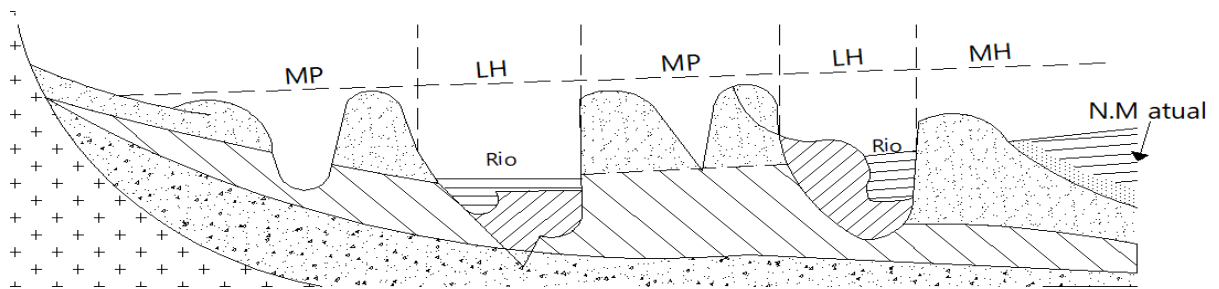
Fonte: Adaptado MASSAD (2010)

Figura 5: 4º estágio: Máximo de Transgressão Santos (Holoceno)



Fonte: Adaptado MASSAD (2010)

Figura 6: 5º estágio: Regressão em direção ao N.M. atual



Fonte: Adaptado MASSAD (2010)

2.2 ATERRO DE SOLO MOLE

As características dos solos moles, como a baixa resistência à penetração, dificultam as construções, tornando necessário adotar técnicas que permitam ultrapassar essas dificuldades, através da redução da compressibilidade e do aumento da permeabilidade do solo.

De acordo com Marangon (2009), a construção de aterros sobre solos moles requer do engenheiro uma série de conhecimentos técnicos que abrangem desde as fases de investigação do terreno e de elaboração do projeto geotécnico propriamente dito, até as de execução e de controle de obra.

Figura 7: Aterro sobre solo mole.



Fonte: FIXSOLO (2014)

Os problemas associados à construção de aterros sobre solos moles, se relacionam ao ponto de vista técnico, segundo Massad (2010):

- I. A estabilidade do aterro logo após a construção;
- II. Os recalques dos aterros ao longo do tempo;
- III. Aterros de encontro com obras de arte (pontes e viadutos);
- IV. Estabilidade das fundações destas obras;
- V. Recalques diferenciais entre aterro e obras de arte;
- VI. Efeitos colaterais no estaqueamento (empuxos de terra e atrito negativo).

Do ponto de vista construtivo os problemas mais comuns são:

- I. Tráfego dos equipamentos de construção;
- II. Amolgamento da superfície do terreno, devido ao lançamento do aterro;
- III. Riscos de ruptura durante a construção;
- IV. Dificil escavação;
- V. Dificil manutenção de acessos.

Ao iniciar um projeto é indispensável identificar o depósito de solos moles e sua extensão e suas propriedades geotécnicas.

2.3 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

As investigações geotécnicas devem ser programadas e executadas seguindo as recomendações das normas, o conhecimento do perfil do subsolo ao longo das áreas de interesses, bem como características à compressibilidade e resistência ao cisalhamento e deve permitir o desenvolvimento das soluções de projeto adequadas a cada caso. Após a constatação nos ensaios previstos na NBR 8044:2018, referente a projetos Geotécnicos, que regulamenta os estudos e projetos geotécnicos, são programadas as investigações a serem realizadas.

Os métodos de investigação do subsolo se classificam em duas categorias principais, segundo Queiroz (2009):

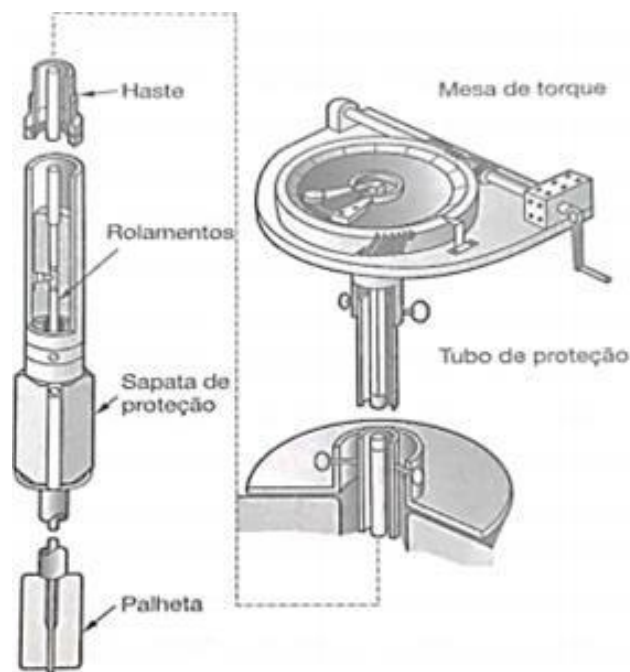
- I. Indiretos: São aqueles em que as determinações das propriedades das camadas do subsolo são extraídas indiretamente pela medida, seja da sua resistividade elétrica ou da velocidade de propagação de ondas elásticas. Os índices medidos mantêm correlações com a natureza geológica dos diversos horizontes, podendo-se ainda conhecer as suas respectivas profundidades e espessuras. Incluem-se nessa categoria os métodos geofísicos.
- II. Diretos: são ensaios que permitem a observação direta do subsolo. Nesses ensaios, podemos colocar amostras, alguma perfuração, escavação ou também fazer medições de propriedades do solo com o contato direto de uma sonda com o material.

O tipo comumente utilizado na construção civil é a investigação direta, que consiste em coletas de amostras para análise detalhada do solo, além da sondagem.

Sondagens de reconhecimento do subsolo, previstos na NBR 6484:2001, determinam o tipo de solo em suas respectivas profundidades de ocorrência, a posição do nível da água, os índices de resistência à penetração através da perturbação e amostragem do solo, como também medidas do índice de resistência a penetração.

De acordo com Almeida e Marques (2014), o ensaio de palheta, observado na figura 6, também conhecido como vane test, é realizado para determinar a resistência ao cisalhamento não drenada, de depósitos de argila mole.

Figura 8: Equipamento para o ensaio de palheta



Fonte: Ortigão e Collet (1987) *apud* Schnaid e Odebrecht (2012)

Dado o caráter problemático da utilização de solos moles no âmbito geotécnico, foram - e vem sendo desenvolvidos - diversos métodos construtivos para aterros sobre solos moles.

2.4 ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO

Segundo Almeida e Marques (2014), a escolha do método construtivo de aterro sobre solos moles, está diretamente relacionada com os seguintes tópicos:

- I. Características geotécnicas dos depósitos;
- II. Área do entorno da construção;
- III. Prazos construtivos;
- IV. Custos envolvidos.

2.4.1 Substituição do solo mole

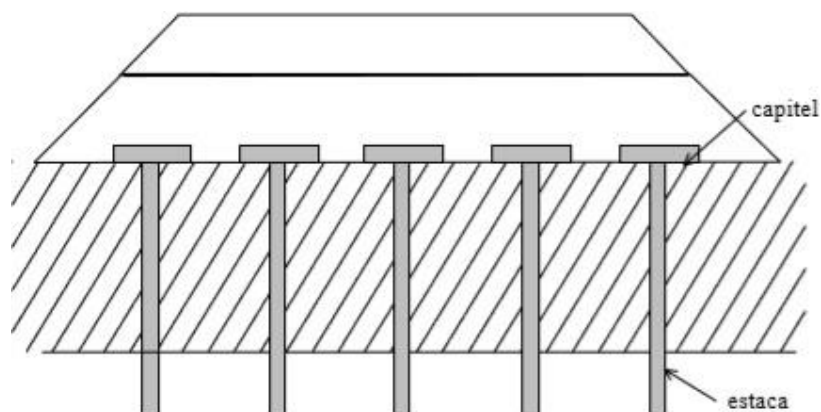
Segundo Almeida e Marques (2010), este método, geralmente utilizado em camadas de até 4,0m de espessura de solo mole, consiste na retirada parcial ou total do solo, a fim de eliminar recalques e aumentar a segurança, quanto à ruptura do sistema.

2.4.2 Aterros estruturados (estaqueado)

Pode ser apoiado sobre estacas de concreto, madeira tratada disposta em malha quadrada ou até sobre colunas de areia ou brita, ou ambos (figura 9). Sua grande vantagem é a diminuição do tempo de execução do aterro, pois pode ser realizado em uma única etapa.

Segundo Spotti (2006), aterros estaqueados têm como princípio transferir as cargas do aterro para camadas mais competentes do subsolo através de estacas ou colunas, resultando assim em um alívio das tensões na camada mole ao redor das estacas e diminuindo os recalques excessivos.

Figura 9: Aterro sobre estacas



Fonte: Manual DNIT

2.4.3 Aterros Leves (EPS)

Os materiais normalmente usados em aterros têm densidade elevada, que pode chegar a 2 Tf por metro cúbico, peso aplicado como sobrecarga ao solo. Em terrenos moles isso gera recalques elevados e até mesmo rupturas.

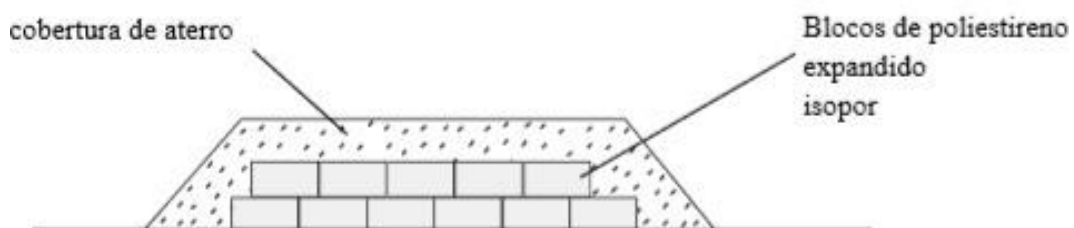
Segundo Almeida e Marques (2014), a magnitude dos recalques primários de aterros sobre solos moles está diretamente ligada ao acréscimo de tensão vertical causado pela sua construção. Por essa razão, a utilização de materiais leves visa reduzir significativamente o valor destes recalques, promovendo também melhores condições de estabilidade, diminuição de recalques diferenciais e implantação rápida da obra (figura 10 e 11).

Ainda segundo o autor, o peso específico para o poliestireno expandido é de 0,15 a 0,30 kN/m³, o menor peso específico quando comparado a outros materiais que possam ser usados para aterros, como: pneus picados (de 4 a 6 kN/m³), argila expandida (de 5 a 10 kN/m³) e serragem de (8 a 10 kN/m³). A utilização de EPS exige que este material esteja protegido da interferência de água, assegurando que esteja elevado do nível do lençol freático máximo e impermeabilizado para que não ocorra percolação no material.

A análise da profundidade do lençol freático é de suma importância. A camada

de EPS deve sempre ficar acima do nível d'água, caso contrário, pode ocorrer à ruptura do aterro devido à subpressão - pressão negativa ascendente comum em estruturas posicionadas abaixo do nível do lençol freático. O estudo do nível d'água deve levar em consideração não somente a profundidade atual, mas também o histórico. Isso porque as variações climáticas, principalmente as chuvas de alta intensidade, interferem no lençol freático, fazendo a camada subir ou descer com o passar do tempo.

Figura 10: Aterro Leve (EPS)



Fonte: Manual DNIT

Figura 11: Aterro leve com EPS.

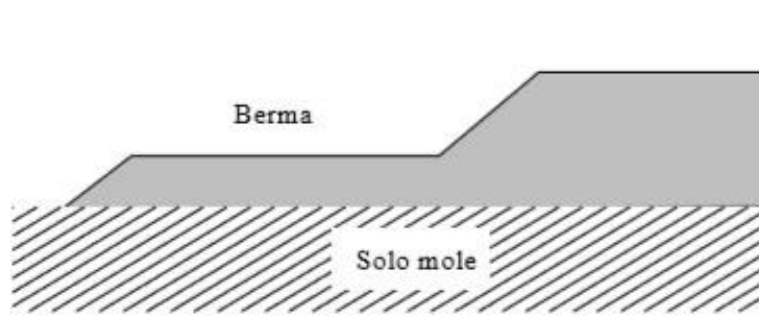


Fonte: LOUZAS (2014)

2.4.4 Aterros com bermas de equilíbrio

De acordo com Almeida e Marques (2014), esta técnica tem como função aumentar a estabilidade do conjunto formado pelo solo mole e aterro, são empregadas a fim de suavizar a inclinação média de um talude de um aterro. A principal condição de sua viabilidade são a necessidade de áreas laterais para sua implantação e a quantidade de material necessário de aterro (figura 12).

Figura 12: Aterro com berma



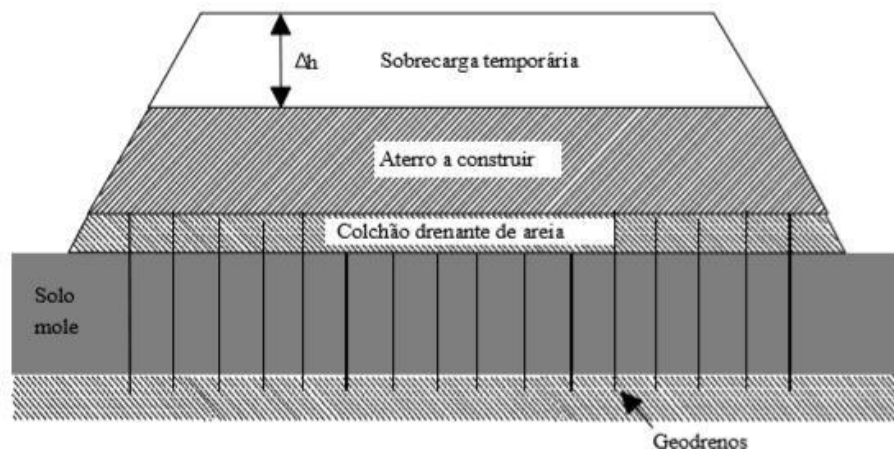
Fonte: Manual DNIT

2.4.5 Pré-carregamento ou sobrecarga temporária e auxílio de Geogrenos

Utilizada para aumentar a velocidade dos recalques primários e compensar de forma parcial ou total dos recalques secundários colocando uma sobrecarga temporária que em geral chega a ser de 25% a 30% do peso do aterro. Suas

desvantagens são tanto o tempo que demora para a estabilização dos recalques quanto o grande volume de terraplenagem necessário. Conforme a norma DNERPRO 391/98, referente a projetos de aterros sobre solos moles para obras viárias (DNIT), os geodrenos são elementos drenantes constituídos por materiais sintéticos. São cravados verticalmente no terreno dispostos em malha, permitindo a drenagem e acelerando os recalques. São constituídos por pelo menos dois materiais: o miolo drenante, que tem o objetivo de conduzir a água até a superfície do terreno pelo colchão drenante e resistir aos esforços de instalação e da deformação do aterro e o seu revestimento, que tem a função de reter o solo e permitir a passagem da água. Em geral seu emprego é mais econômico para espessuras de solo mole de até 20m (figura 13).

Figura 13: Aterro com sobrecarga temporária

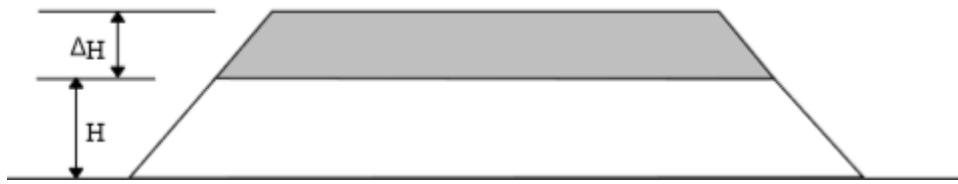


Fonte: MANUAL DNIT

2.4.6 Construção por Etapas

Segundo Almeida e Marques (2014), esta técnica é utilizada quando a resistência ao cisalhamento do solo é muito baixa, implica em subdividir a altura do aterro. Gradativamente promove o aumento da resistência ao cisalhamento do solo mole através do acréscimo das tensões efetivas após cada etapa de aplicação de cargas inferiores ao carregamento final (figura 14).

Figura 14: Aterro por partes

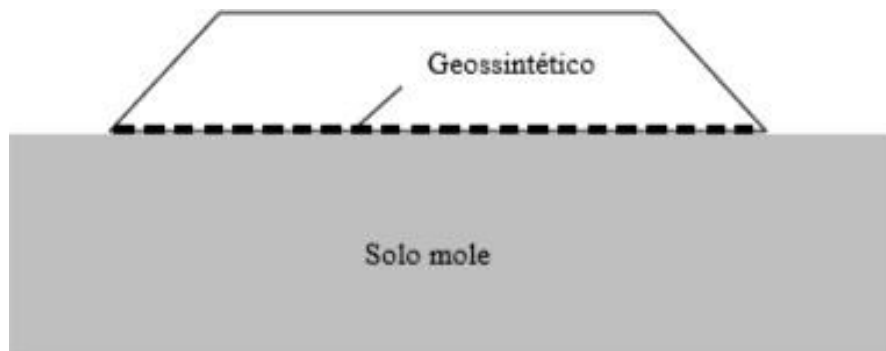


Fonte: Manual DNIT

2.4.7 Aterros reforçados com geossintéticos

Ainda segundo Almeida e Marques (2014), esta variante, proporciona melhor distribuição de tensões aplicadas pelo aterro sobre o solo de fundação (figura 15). Atua na estabilidade do aterro reduzindo os deslocamentos laterais. Consiste na inclusão na base do aterro de materiais poliméricos, de elevada resistência aumentando a capacidade de carga da fundação. Serve para reforçar ou restringir deformações do aterro, mas sem nenhuma influência significativa nos recalques.

Figura 15: Aterro com geossintéticos

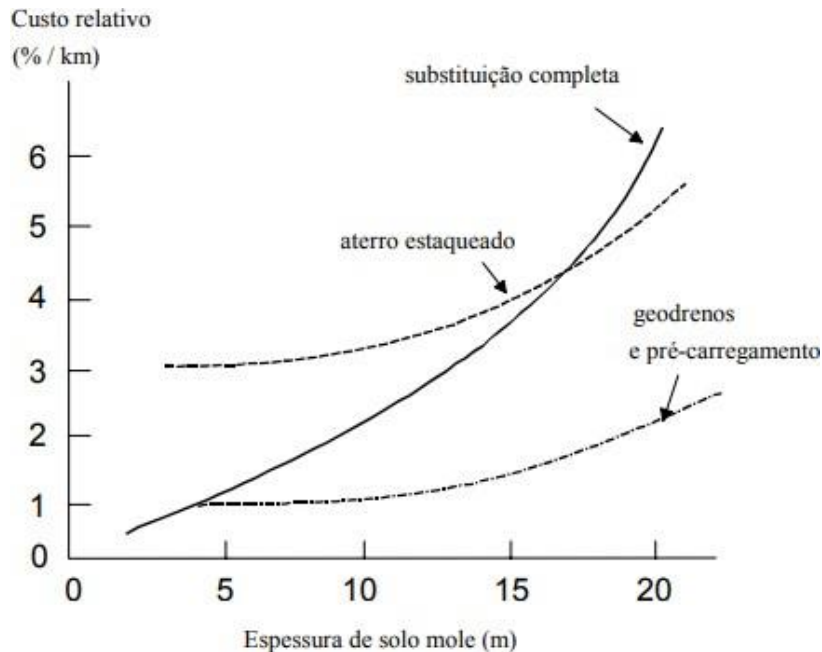


Fonte: Manual DNIT

2.4.8 Comparativo

Na figura 16 é possível observar um gráfico representando a comparação das técnicas de substituição apresentadas nos tópicos anteriores.

Figura 16: Gráfico Comparativo das técnicas supracitadas



Fonte: Adaptado DER/SP

Segundo Valerim Jr. (2010), a utilização de blocos de EPS constitui uma ótima solução para aterros em áreas onde o solo apresenta baixa capacidade de carga (solos compressíveis).

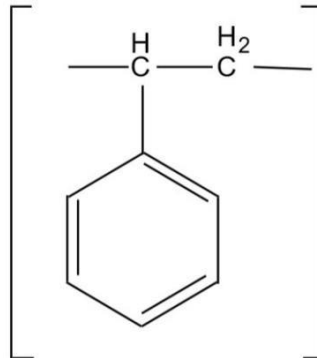
2.5 POLIESTIRENO EXPANDIDO

Segundo Tessari (2006), descoberto pelo alemão Eduard Simon em 1839, o poliestireno (PS) foi o primeiro entre os termoplásticos, desde então tem se apresentado significativo na produção e no consumo. Pode ser aplicado em diversas áreas, desde fabricações de embalagens até aplicações específicas, como na construção civil ou até em confecção de peças automotivas.

O PS foi produzido em escala pela primeira vez em 1938 nos Estados Unidos. Segundo Montenegro e Serfaty (2003), o poliestireno pertence ao grupo das resinas termoplásticas, inclui, entre outros, os polietilenos (de alta densidade; baixa densidade; e baixa densidade linear), o polipropileno (PP), o policloreto de vinila

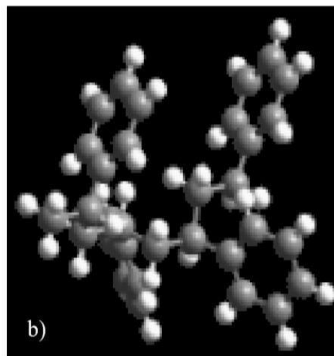
(PVC) e o poli (tereftalato de etileno) (PET). O poliestireno consiste de dois elementos, o carbono e o hidrogênio, representados esquematicamente nas figuras 17 e 18.

Figura 17: Esquema carbono e hidrogênio



Fonte: PINI Abrapex

Figura 18: Esquema carbono e hidrogênio II



Fonte: PINI Abrapex

Segundo Valerim Jr. (2010), a utilização de blocos de EPS constitui uma ótima solução para aterros em áreas onde o solo apresenta baixa capacidade de carga (solos compressíveis). Para esse tipo de construção algumas vantagens referentes a esse material podem ser observadas (figura 19).

Figura 19: Aterro com blocos de EPS



Fonte: Louzas (2014)

2.5.1 Material

Segundo Manual de utilização de EPS na construção civil 1 – PINI – Abrapex (2006), o EPS é obtido por meio da expansão da resina de poliestireno, resultando em uma espuma rígida. A expansão é feita utilizando um agente químico na fase de reação da polimerização. Os hidrocarbonetos criogênicos são os agentes mais utilizados neste caso.

Descoberto por dois químicos, Fritz Stastny e Karl Buchholz, em 1949 na Alemanha, o EPS é a sigla para Poliestireno Expandido ou Expanded Polystyrene, marca registrada pela empresa Knauf Isopor LTDA, e designa, comercialmente, os produtos de poliestireno expandido, comercializados por essa empresa. Se trata de um material plástico celular que pode ser encontrado em diversas formas geométricas e ser utilizado para uma diversidade muito grande de aplicações.

Para a obtenção do EPS utilizamos o PS e submete-se a um processo de transformação física e química, o processo consiste em três fases:

- I. Pré-espansão: Esta fase é realizada em um pré-expansor, no qual é utilizado vapor a cerca de 90°C que faz com que o PS inche para um volume cerca de 50 vezes maior que o seu original e fique com uma densidade menor por conta da liberação de pentano;
- II. Armazenamento intermediário: O armazenamento é necessário para

uma continuidade da expansão das partículas, neste processo as células estabilizam térmica e quimicamente e seu espaço interno é preenchido pelo ar ao redor, por conta da zona de depressão criada pelo resfriamento. As partículas ficam em torno de 6 horas em silos de armazenamento até irem para a próxima fase;

III. Moldagem:

Nesta última fase as partículas pré-expandidas são introduzidas em moldes e novamente submetidas a vapor de água, em uma câmara onde se aplica vácuo. Com o calor do vapor aplicado as cápsulas se expandem se moldando ao recipiente e aderindo-se umas as outras, dando origem ao EPS.

De acordo com José Orlando, 2008, por ser um polímero, não se conhece adequadamente o tempo de vida útil do EPS. No entanto, as propriedades do EPS sugerem que se corretamente aplicado, pode-se apresentar um desempenho adequado ao longo da vida útil da obra. Por ser um composto inerte, atóxico, não-biodegradável, não dissolúvel e não possui valores nutritivos para abrigar micro-organismos, tornando-o assim um material sem prazo de validade, o poliestireno expandido tem durabilidade indeterminada.

2.6 DEFINIÇÃO DE TENSÃO

Segundo Fiori e Carmignani (2013), o significado de tensão surge da 3ª Lei de Newton, lei da ação e reação, que afirma que para cada corpo A que exerce uma força sob um corpo B, este corpo B irá exercer uma força de mesma intensidade, direção e sentido contrário sobre o corpo A.

A magnitude da tensão depende da força atuante e do tamanho da área da superfície afetada. Têm-se então a equação da tensão definida pela equação (01) a seguir:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Onde:

σ : é a representação de tensão;

F: a força aplicada;

A: a área da superfície.

De acordo com Marangon (2018), para tensões de solo utilizamos o conceito de tensão em um meio particulado. Os solos são constituídos de partículas e que forças aplicadas a eles são transmitidas de partícula a partícula, além das que são transportadas pela água dos vazios. Essas forças dependem do tipo de mineral, nas partículas maiores, onde as três dimensões ortogonais são aproximadamente iguais, como são os grãos de silte e de areias, a transmissão se faz através do contato direto de mineral a mineral. Já na argila no caso de número de partículas muito grande, as forças em cada contato são muito pequenas e a transmissão pode ocorrer através da água quimicamente absorvida.

2.7 RECALQUE

De acordo com Cernica (1995) todo material se deforma sujeito à uma carga no solo, ao contrário dos materiais mais homogêneos, tais como o aço e o concreto. A deformação ocorre devido ao adensamento que diminui o índice de vazios dentro do solo, também com o deslocamento lateral e vertical com o aumento contínuo de carga, fazendo com que ele se rompa devido ao cisalhamento.

Segundo Bowles (1979), a dificuldade em examinar as características do solo

ocorre devido a formações relativamente homogêneas ou mesmo em pequenas dimensões. Os métodos de análise teóricos ou empíricos são amplamente diversos em literaturas. As variadas imprecisões encontradas em amostras devido à heterogeneidade do material são os problemas encontrados em parâmetros quando adquiridos em condições realmente representativas.

Segundo Das (2007), o recalque se dá em três etapas distintas: recalque elástico, por adensamento primário e compressão secundária.

2.7.1 Recalque elástico

Para o cálculo do recalque elástico ocasionado pelo aterro, utiliza-se a equação (02) encontrada em PINTO (2002).

$$\rho = Ix((\sigma ox B)/E)x(1 - v^2)$$

Onde:

σo = pressão uniformemente distribuída na superfície;

E = módulo de elasticidade;

v = coeficiente de Poisson

B = a largura (ou diâmetro) da área carregada;

I = coeficiente que leva em conta a forma da superfície carregada.

2.7.2 Recalque por adensamento

O Cálculo do recalque por adensamento baseia-se na curva de compressibilidade (figura 20) e a partir dela podemos extrair os dados necessários às posteriores análises. A equação utilizada para o cálculo do recalque por adensamento baseia-se na equação (03) proposta pela MB 3336 da NBR 12007:1990 descrita abaixo:

$$\Delta h = \frac{Hi}{1 + ei} x H$$

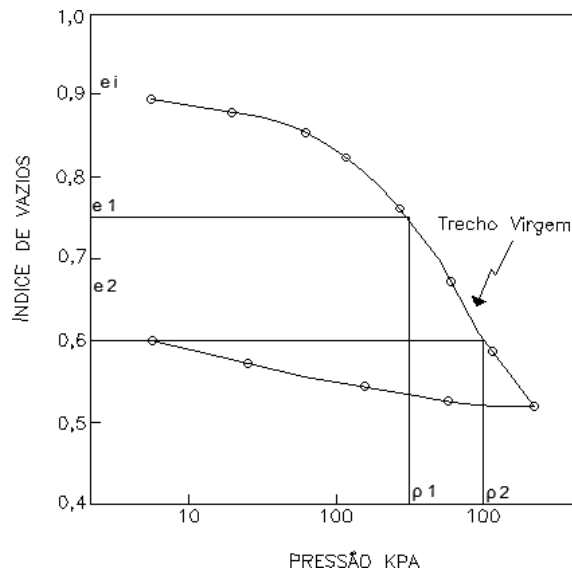
Onde:

ei = índice de vazios inicial;

Hi = índice de vazios final;

H = espessura da camada de argila.

Figura 20: Curva de compressibilidade



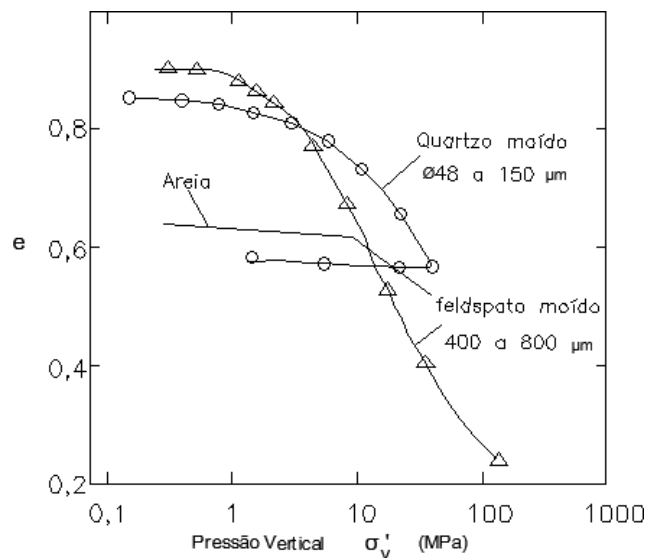
Fonte: Adaptado NBR12007

2.7.3 Compressão secundária

São aquelas que evoluem com o tempo sob um estado de tensões constantes. O adensamento secundário constitui uma redução do índice de vazios enquanto a tensão efetiva se mantém constante. Desta forma, o coeficiente de adensamento secundário será constante para todas as tensões efetivas.

O estudo da compressibilidade de solos arenosos pode ser compreendido a partir dos resultados de ensaios de compressão confinada, realizados por Robert (1964) e apresentados na Figura 21.

Figura 21: Gráfico da compressibilidade



Fonte: Adaptado Robert (1964)

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 ATERROS LEVES

Segundo Almeida e Marques (2014), o aumento de recalques em aterros sobre solo mole é diretamente proporcional à tensão vertical causada pela sua construção. Por este motivo, a utilização de EPS se faz promissora, visto que por se tratar de um material leve, reduz consideravelmente o valor de recalques proporcionando assim estabilidade do sistema.

3.1.1 ATERROS LEVES COM EPS

Como mencionado no início deste trabalho, segundo Maccarini, (2013), EPS é uma abreviação para Poliestireno Expandido ou Expanded PolyStyrene. Consiste em um material celular plástico composto de pequenas partículas esféricas, contendo 98% de ar em sua estrutura. Este material já é usado na construção civil comumente para isolamento térmico e acústico e preenchimento de lajes treliçadas. Contudo, em 1972, foi utilizado pela primeira vez, na Noruega, para a construção de aterro rodoviário, sobre solos saturados (figura 22).

Figura 22: Utilização de blocos de EPS



Fonte: MOPE EPS (2015)

Devido às condições favoráveis e vantagens do EPS, aliados com o sucesso da técnica em experiências norueguesas, levaram outros países a pesquisarem sobre seu potencial em obras de infraestrutura viária. Nesse contexto, Maccarini (2013), destaca alguns dados referentes ao consumo e utilização do EPS ao longo dos anos:

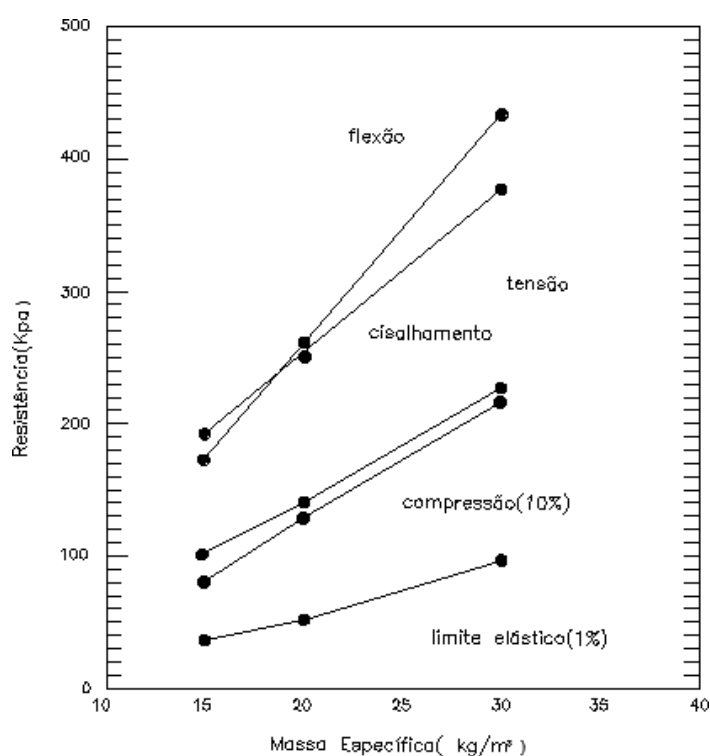
- I. O consumo de EPS no Japão, no período de 1986, quando esse material foi introduzido no país, até o final de 2008, foi cerca de 5.030.000 m³, totalizando 10.500 projetos. Desse total, 85% foram utilizados na construção de aterros rodoviários;
- II. Na América do Sul, Chile e Venezuela utilizam o EPS para fins rodoviários há vários anos;
- III. No Brasil, algumas obras de aterros rodoviários foram construídas com o uso do EPS, sendo a primeira delas realizada no estado da Bahia. O principal fator limitante que contribui para utilização deste material na construção rodoviária do país refere-se aos custos de fabricação e transporte dos blocos de EPS.

3.1.2 O MATERIAL

Como mencionado anteriormente neste trabalho, o EPS é considerado um material extremamente leve devido aos valores de sua massa específica.

Avesani Neto (2009) evidencia a importância do rígido controle deste valor nas propriedades mecânicas e hidráulicas do material. Exemplos de correlações que podem ser obtidas com a massa específica do EPS podem ser observados na Figura 23.

Figura 23: Correlações obtidas com a massa específica do EPS



Fonte: Adaptado BASF (1991) apud Avesani Neto (2009).

De acordo com Avesani Neto (2009), a resistência à compressão do EPS pode ser demonstrada através do ensaio de compressão uniaxial realizado com 350 blocos comerciais de EPS. Segundo a Tabela 1, pode-se verificar a grande amplitude dos valores de resistência encontrados (50 a 300kPa) frente a pequena variação da massa específica analisada (10 a 40 kg/m³).

Tabela 1: Estatísticas de todos os ensaios de compressão uniaxial.

Massa específica (kg/m ³)	Resistência (kPa)			Desvio Padrão	Variação (%)
	Máximo	Mínimo	Média		
30	300,21	222,96	264,05	17,21	6,52
20	199,02	139,32	157,62	13,92	8,83
17	127,35	103,38	115,02	7,42	6,45
14,5	87,05	72,31	79,46	5,04	6,35
10	61,98	50,10	55,25	3,05	5,52
10 (reciclado)	59,88	47,57	53,52	2,89	5,40

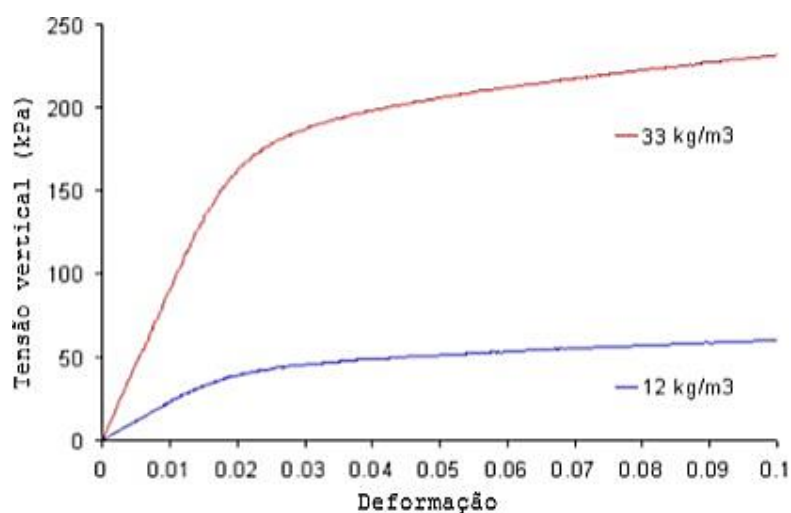
Fonte: Avesani Neto (2009)

3.1.3 TENSÃO *versus* DEFORMAÇÃO

Segundo Maccarini (2013), para aterros rodoviários, caso as tensões atuantes sobre o EPS ultrapassem seu limite elástico, este material sofrerá deformações plásticas, irrecuperáveis, que serão refletidas no pavimento asfáltico através da formação de trilhas de roda.

Negussey e Elragi (2000), Elragi (2006) apud Sakamoto (2018) relacionam a massa específica do EPS com gráficos de tensão versus deformação, propondo valores de deformação próximos a 2% para região considerada elástica, conforme apresentado na figura 24. Para o dimensionamento de estruturas rodoviárias, geralmente, as tensões atuantes devem corresponder a 1% da deformação do EPS.

Figura 24: Gráfico tensão versus deformação para compressão uniaxial de blocos de EPS

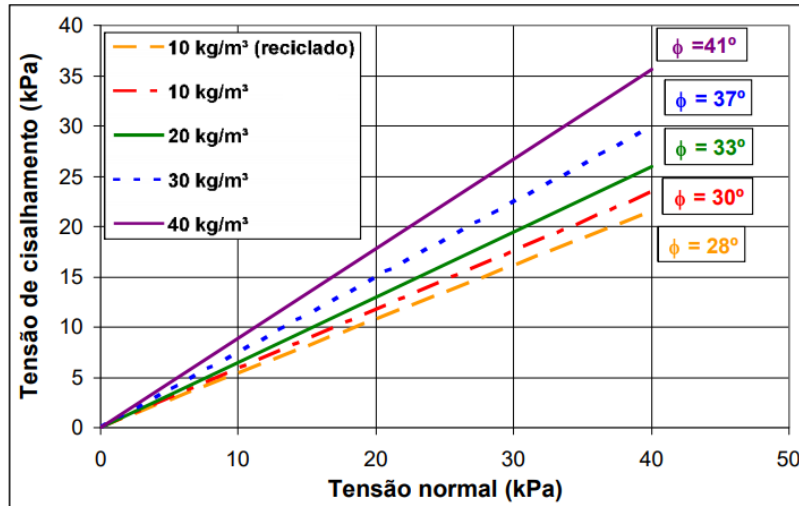


Fonte: Negussey e Elragi (2000), apud Sakamoto (2018).

3.1.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

De acordo com Avesani Neto (2009), através da realização de ensaios de cisalhamento direto, foram obtidas as envoltórias de esforço demonstradas na figura 24. Constatando assim, que ao elevar-se a massa específica do EPS aumenta-se o ângulo de atrito (ϕ) do material. Essa relação é considerada linear pelo autor conforme pode ser provado na Figura 25, cujo R^2 corresponde a um valor de 0,86.

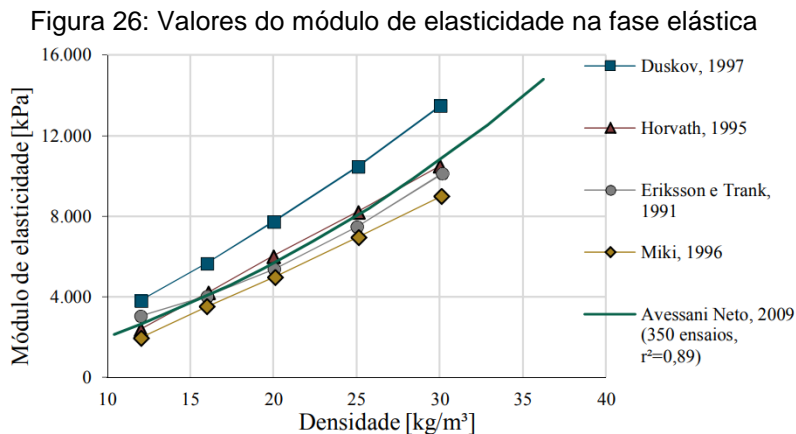
Figura 25: Envolvórias de resistência de amostras de EPS



Fonte: Avesani Neto (2009)

3.1.5 PARÂMETROS ELÁSTICOS

Sakamoto (2018) relata a dispersão dos valores do módulo de elasticidade (E) apresentados por diversos autores, como mostra a figura 26.



Fonte: Sakamoto (2018). Adaptado de Elragi (2006) e Avesani Neto (2009).

3.1.6 PROCESSO CONSTRUTIVO

Segundo Avesani Neto (2009), o processo construtivo de um aterro com a utilização de EPS é relativamente simples e pode ocorrer através das seguintes etapas:

- I. Sobre o solo limpo coloca-se uma camada de areia, cuja finalidade é nivelar o perfil para receber os blocos de EPS;

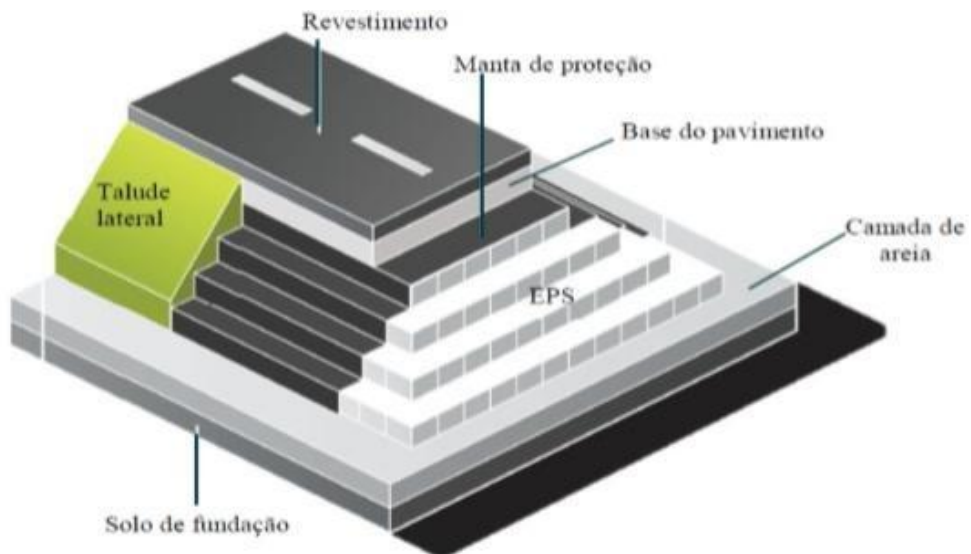
- II. Os blocos são colocados em juntas de amarração, semelhante a uma parede de tijolos, formando um tronco de pirâmide;
- III. Logo após são cobertos por uma membrana sintética a fim de protegê-los contra solventes que possam atacá-los;
- IV. Por fim, coloca-se a base para o pavimento e aterros laterais isolando, assim, os blocos do meio externo.

Conforme Maccarini (2017), outros elementos que contribuem para a durabilidade e vida útil desse tipo de aterro são:

- I. Nas duas laterais e na face frontal, recomenda-se a construção de um muro de concreto armado. Esse possui a finalidade de proteger o aterro contra eventuais colisões de veículos ou mesmo possíveis atos de vandalismo;
- II. Recomenda-se a construção de uma laje de concreto entre a camada de base do pavimento e os blocos de EPS, cuja finalidade é promover o espraiamento das tensões sobre o material, evitando deformações plásticas;
- III. É recomendável, também, uma "amarração" entre blocos de uma mesma camada e camadas diferentes através de fixadores metálicos, específicos para tal finalidade.

A estrutura dos principais elementos para um aterro construído com blocos de EPS pode ser observada na figura 27.

Figura 27: Componentes principais para construção de aterro com EPS

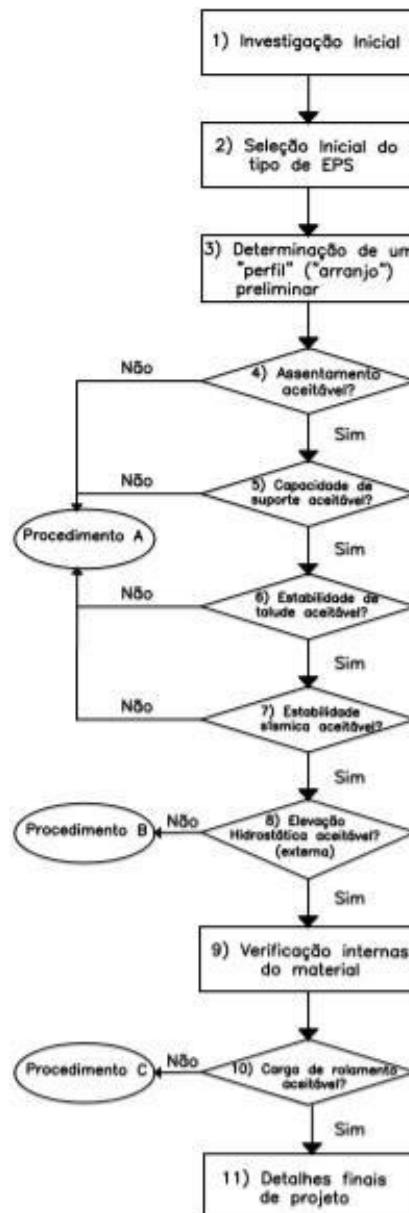


Fonte: SPI (2018) apud Sakamoto (2018)

3.1.7 VERIFICAÇÕES EXTERNAS E INTERNAS

Arellado (2010) dispõe em um fluxograma um resumo dos principais pontos das verificações externas e internas relacionadas a construção de um aterro com blocos de EPS, apresentado na figura 28.

Figura 28: Fluxograma de verificações de um projeto de aterro com EPS



Fonte: Adaptado Arellano (2010)

Os procedimentos A, B e C, citados pelo autor, podem ser descritos como, segundo Arellado (2010):

- I. Procedimento A: Garantir o nivelamento e estabilidade dos blocos, verificando se o solo pode ser parcialmente escavado até uma profundidade em que haja a estabilidade de assentamento dos blocos se não for possível, realizar a implantação de reforço no terreno;
- II. Procedimento B: No caso de haver a possibilidade de submersão dos blocos por elevação do nível d'água. Deve verificar se a espessura do material de sobrecarga sobre o EPS pode ser aumentada. Caso não

seja possível, dada a configuração geométrica desejada, recomenda-se empregar algum tipo de ancoragem dos blocos no terreno, ou melhorar o solo para que a ancoragem seja realizável. Maccarini (2017) indica um fator de segurança entre 1,1 e 1,2 para a flutuação do conjunto de EPS.

- III. Procedimento C: Verificar se os blocos de EPS podem ser escolhidos com um limite elástico maior que as tensões estimadas para a passagem de veículos ou deverá ser feito estudo de uma técnica auxiliar que permita a utilização dos blocos.

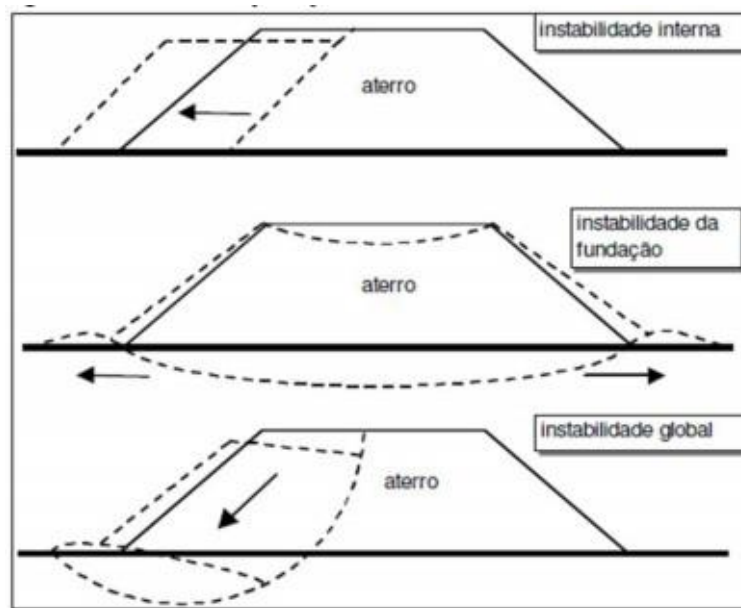
3.2 ATERRO CONVENCIONAL

A execução de aterros sobre solos moles exige aprofundadas técnicas de geotecnia, devido à baixa capacidade de sustentação destes solos e dúvidas quanto ao seu comportamento ao longo do tempo.

De acordo com Almeida e Marques (2010), deve-se analisar alguns fatores cruciais que vão definir qual a melhor técnica a ser empregada sobre determinado aterro.

Segundo Massad (2010), a análise da estabilidade de taludes baseia-se na hipótese do equilíbrio da massa de solo na iminência do processo de escorregamento (ruptura). Nesse sentido, as tensões de cisalhamento, induzidas por forças atuantes no solo, podem ser determinadas por meio de equações de equilíbrio. Realiza-se, portanto, a comparação dessas tensões com a resistência ao cisalhamento do solo (figura 29).

Figura 29: Modos de ruptura para aterros sobre solos moles



Fonte: Almeida e Marques (2014)

Conforme DNER (1998), os aterros para obras rodoviárias podem ser divididos nas seguintes classes:

- I. Classe I: Aterros junto a estruturas rígidas, como pontes, viadutos e demais intersecções, bem como aterros próximos a estruturas sensíveis como oleodutos;
- II. Classe II: Aterros que não se encontram próximos à estruturas sensíveis e possuem alturas maiores que 3m;
- III. Classe III: Aterros que não se encontram próximos à estruturas sensíveis e possuem alturas menores que 3m.

De acordo Dner (1998), o fator de segurança também indica os limites mínimos que deverão ser atingidos com base nas classes de aterros mencionadas anteriormente.

Figura 30: Fatores de segurança

Aterro classe	FS mínimo
I	1,4
II	1,3
III	1,2

Fonte: DNER (1998)

3.2.1 BERMAS DE EQUILÍBRIO

Segundo a NBR 11682:2009, a altura máxima crítica (H_c) de um aterro convencional sobre a argila mole pode ser feita utilizando-se teorias de capacidade de carga, que avaliam qual a altura máxima do aterro para que não ocorra o risco do deslizamento lateral (equação 4).

$$H_c = 5,14 \cdot \frac{S_u}{\gamma}$$

Onde:

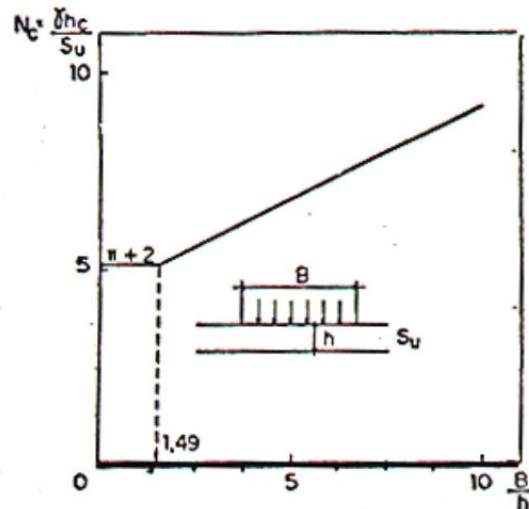
H_c : altura crítica

S_u : a resistência não drenada da camada de argila

γ : peso específico do aterro

No caso de aterros de largura média B da base grande em relação à espessura da camada h , ou seja, $B/h > 1,5$, deve ser utilizada a figura 31 para a obtenção da capacidade de carga (N_c), a ser empregado no lugar na equação 4.

Figura 31: Ábaco para cálculo de altura crítica de aterros



Fonte: Jakobson 1948

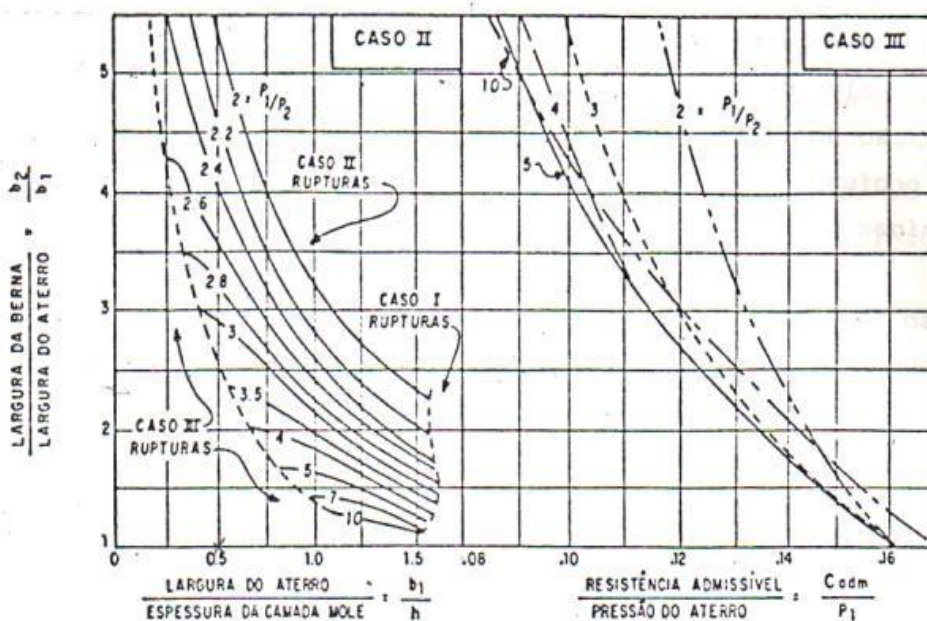
Após o estudo da altura crítica feita e a mesma ultrapassar os limites das propostas, a técnica de bermas de equilíbrio é uma das soluções adotadas para garantir a estabilidade global do conjunto formado pelo solo mole e pelo aterro. Consiste de uma técnica cujo princípio de estabilização é puramente físico, não havendo modificações nas propriedades dos solos existentes na fundação. Os principais condicionantes do emprego de bermas de equilíbrio referem-se à quantidade.

Segundo Sousa Pinto (1989), bermas de equilíbrio são aterros laterais junto ao talude para equilibrar o peso exercido pelo aterro principal, visando impedir o expurgo de solos moles. Esta berma é responsável por criar um momento contrário ao de ruptura provocado pelo peso do aterro.

Segundo DNER-PRO 381/98, o projeto de bermas de equilíbrio é gerado mediante tentativas, modificando a geometria do talude e se adequando conforme a peculiaridade de cada projeto.

Para definição do talude do aterro e de sua resistência, um dos métodos utilizados é o ábaco de Jakobson aplicável a solos moles com resistência não drenada constante com a profundidade conforme figura 32.

Figura 32: Ábaco para cálculo das dimensões da berma de equilíbrio



Fonte: Jakobson 1948

3.2.2 ADENSAMENTO DE SOLO MOLE

Segundo Pinto (2006), a Teoria do Adensamento Unidimensional, desenvolvida por Terzaghi, baseia-se nas seguintes hipóteses:

- I. O solo é totalmente saturado;
- II. A compressão e o fluxo d'água são unidimensionais (direção vertical);
- III. O solo é homogêneo;
- IV. As partículas de solo e a água são incompressíveis;
- V. A massa de solo pode ser analisada em termos de elementos infinitesimais;
- VI. O fluxo segue a Lei de Darcy;
- VII. As propriedades do solo não se alteram no processo de adensamento;
- VIII. O índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva durante o processo de adensamento.

De acordo com Pinto, (2006), o resultado de ensaios de adensamento, pode ser redesenhado com as abcissas indicando o logaritmo das pressões aplicadas. Fica então com o aspecto de uma determinada tensão σ_a' , o índice de vazios varia linearmente com o logaritmo da pressão aplicada, pelo menos num bom trecho após esta tensão. Este trecho retilíneo da curva é denominado reta virgem.

Terzaghi introduziu o índice de compressão para indicar a inclinação da reta virgem, descrito pela expressão (equação 5):

$$C_c = \frac{(e_1 - e_2)}{(\log \sigma_2 - \log \sigma_1)}$$

Ainda segundo Pinto (2006), quando não se utiliza o ensaio de adensamento, expresso pela curva do índice de vazios em função da pressão aplicada, utiliza-se a equação a seguir (equação 6):

$$\rho = \frac{C_c * H_1}{(1 + e_1)} * \log \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

De acordo com Pinto (2006), tratando-se de solos sobreadensados não se deve utilizar a equação 6. Quando o carregamento ultrapassa a tensão de pré adensamento, o recalque é calculado em duas etapas: da tensão existente até a tensão de pré adensamento e deste até a tensão final resultante do carregamento. A expressão geral para o cálculo dos recalques, fica (equação 7):

$$\rho = \frac{H}{1 + e_1} \cdot (C_r \cdot \log \frac{\sigma_a}{\sigma_i} + C_c \cdot \log \frac{\sigma_f}{\sigma_a})$$

4. ANÁLISE COMPARATIVA: ATERRO COM EPS *versus* ATERRO CONVENCIONAL

Para melhor compreensão do tema abordado e respectiva análise comparativa, neste tópico são apresentados resultados realizados através das equações apresentadas anteriormente neste trabalho.

4.1 PARÂMETROS

Para dar-se início aos respectivos cálculos, alguns parâmetros foram adotados:

- I. Altura do aterro: Para a análise, serão utilizadas alturas de aterro de 1 a 8 metros.
- II. A espessura do solo mole: será considerada de 4,5 a 8 metros.
- III. Peso específico do EPS: 0,18kN/m³
- IV. Peso específico do aterro: 18kN/m³
- V. Peso específico aluvião (solo aluvionar): 14,5 kN/m³. Para execução dos cálculos de recalque unidimensional, segundo Pinto (2002), aluviões ou solos aluvionares são constituídos principalmente por solos arenosos e argilosos e foram formados pelo carregamento da água, comuns nas várzeas quaternárias dos córregos e rios. Pode-se também ser formado pela ocorrência de camadas sobrepostas de granulometria distintas, devida a diversas épocas e regimes de deposição.

4.2 ATERRO CONVENCIONAL *versus* ATERRO COM EPS

Dando início aos cálculos de análise, é realizado o cálculo de tensão efetiva do solo, através da equação 8 demonstrada abaixo:

$$\sigma_1' = \gamma \cdot (h/2)$$

Onde: σ' é a tensão em kPa;

γ : é o peso específico do solo kN/m³;

h : altura do aterro em metros;

Utilizando as espessuras de solo de 4,5 a 8 metros, obtemos as respectivas tensões efetivas, observadas na Tabela 2.

Tabela 2: Tensões efetivas do solo.

Espessura do solo (m)	Tensão Efetiva (kPa)
4,50	32,625
5,00	36,25
6,00	43,5
7,00	50,75
8,00	58

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após calculada as tensões efetivas do solo para as espessuras de 4,50 a 8 metros, é possível dar início ao cálculo de tensão do aterro, calculando assim as tensões observadas para as diferentes espessuras de solo no aterro convencional e no aterro com a utilização de EPS.

Para tal cálculo, utiliza-se a seguinte expressão vista anteriormente neste trabalho (equação 9):

$$\sigma = \sigma' + (\gamma \text{ aterro} \cdot h \text{ aterro})$$

Onde: σ' efetiva do solo em kPa;

σ : tensão do aterro;

γ : peso específico do aterro;

h : altura do aterro.

Sendo assim, é possível calcular a tensão para aterros de até 8 metros, conforme as seguintes tabelas.

A tabela 3 apresenta os resultados de tensão para aterros de um a oito metros, para um aluvião de 4,5m.

Tabela 3: Tensão do aterro para 4,5m de aluvião.

ALTURA	CONVENCIONAL	LEVE
1	50,625	41,715
2	68,625	41,895
3	86,625	42,075
4	104,625	42,255
5	122,625	42,435
6	140,625	42,615
7	158,625	42,795
8	176,625	42,975

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 4 apresenta os resultados de tensão para aterros de um a oito metros, para um aluvião de 5m.

Tabela 4: Tensão do aterro para 5m de aluvião

ALTURA	CONVENCIONAL	LEVE
1	54,25	45,34
2	72,25	45,52
3	90,25	45,7
4	108,25	45,88
5	126,25	46,06
6	144,25	46,24
7	162,25	46,42
8	180,25	46,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 5 apresenta os resultados de tensão de aterros de um a oito metros, para um aluvião de 6m.

Tabela 5: Tensão do aterro para 6m de aluvião

ALTURA	CONVENCIONAL	LEVE
1	61,5	52,59
2	79,5	52,77
3	97,5	52,95
4	115,5	53,13
5	133,5	53,31
6	151,5	53,49
7	169,5	53,67
8	187,5	53,85

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 6 apresenta os resultados de tensão de aterros de um a oito metros, para um aluvião de 7m.

Tabela 6: Tensão do aterro para 7m de aluvião

ALTURA	CONVENCIONAL	LEVE
1	68,75	59,84
2	86,75	60,02
3	104,75	60,2
4	122,75	60,38
5	140,75	60,56
6	158,75	60,74
7	176,75	60,92
8	194,75	61,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 7 apresenta os resultados de tensão de aterros de um a oito metros, para um aluvião de 8m.

Tabela 7: Tensão do aterro para 8m de aluvião

ALTURA	CONVENCIONAL	LEVE
1	76,00	67,09
2	94,00	67,27
3	112,00	67,45
4	130,00	67,63
5	148,00	67,81
6	166,00	67,99
7	184,00	68,17
8	202,00	68,35

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após calculadas as tensões para as diferentes espessuras de solo e alturas de aterro, é calculado então o recalque em cada situação - aterro com EPS e aterro convencional, através da expressão (equação 10):

$$\rho = \frac{H}{1 + e_1} \cdot (C_r \cdot \log \frac{\sigma_a}{\sigma_i} + C_c \cdot \log \frac{\sigma_f}{\sigma_a})$$

A tabela 8 apresenta os resultados de recalque para alturas de aterro de um a oito metros, para um aluvião de 4,5 metros, através da equação 10.

Tabela 8: Recalque (m) para 4,5m de aluvião – Aterro Convencional e com EPS.

ALTURA	CONVENCIONAL	LEVE
1	0,3435	0,1921
2	0,5813	0,1955
3	0,7634	0,1989
4	0,9110	0,2022
5	1,0351	0,2055
6	1,1421	0,2088
7	1,2363	0,2121
8	1,3203	0,2154

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 9 apresenta os resultados de recalque para alturas de aterro de um a oito metros, para um aluvião de 5 metros, através da equação 10.

Tabela 9: Recalque (m) para 5m de aluvião – Aterro Convencional e com EPS.

ALTURA	CONVENCIONAL	LEVE
1	0,3502	0,2573
2	0,5991	0,2604
3	0,7923	0,2635
4	0,9502	0,2665
5	1,0838	0,2696
6	1,1996	0,2726
7	1,3018	0,2757
8	1,3931	0,2787

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 10 apresenta os resultados de recalque para alturas de aterro de um a oito metros, para um aluvião de 6 metros, através da equação 10.

Tabela 10: Recalque (m) para 6m de aluvião – Aterro Convencional e com EPS.

ALTURA	CONVENCIONAL	LEVE
1	0,3609	0,3732
2	0,6285	0,3759
3	0,8412	0,3786
4	1,0178	0,3812
5	1,1688	0,3839
6	1,3006	0,3865
7	1,4176	0,3891
8	1,5228	0,3917

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 11 apresenta os resultados de recalque para alturas de aterro de um a oito metros, para um aluvião de 7 metros, através da equação 10.

Tabela 11: Recalque (m) para 7m de aluvião – Aterro Convencional e com EPS.

ALTURA	CONVENCIONAL	LEVE
1	0,3691	0,4742
2	0,6519	0,4765
3	0,8812	0,4789
4	1,0740	0,4812
5	1,2404	0,4835
6	1,3868	0,4859
7	1,5174	0,4882
8	1,6353	0,4905

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 12 apresenta os resultados de recalque para alturas de aterro de um a oito metros, para um aluvião de 8 metros, através da equação 10.

Tabela 12: Recalque (m) para 8m de aluvião – Aterro Convencional e com EPS.

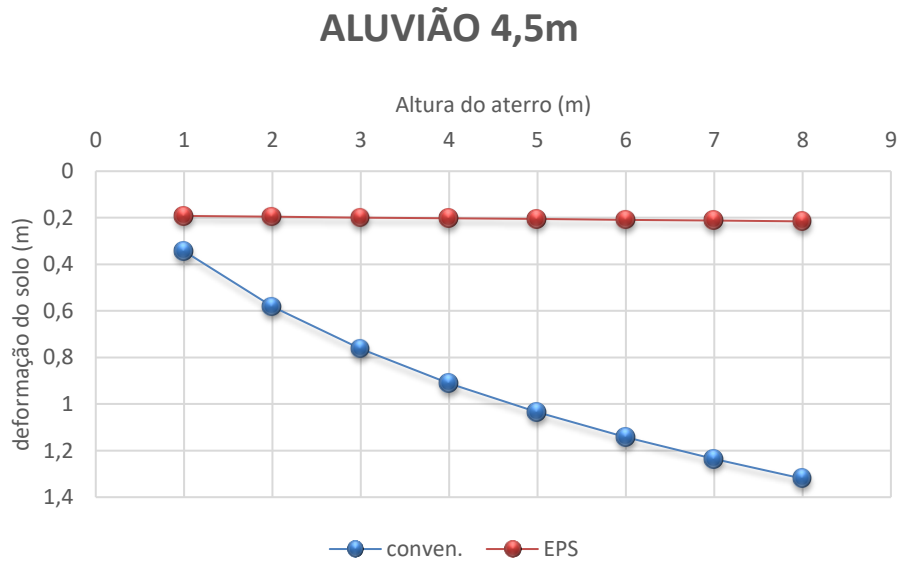
ALTURA	CONVENCIONAL	LEVE
1	0,3756	0,5636
2	0,6710	0,5657
3	0,9145	0,5678
4	1,1216	0,5699
5	1,3019	0,5719
6	1,4614	0,5740
7	1,6044	0,5761
8	1,7342	0,5781

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para facilitar a análise dos resultados obtidos, foram criados gráficos que permitem uma comparação direta entre os dois métodos, podendo ser observados nas imagens a seguir.

A figura 33 apresenta o gráfico comparativo de deformação de solo observadas num aterro de altura de um a oito metros, para um aluvião de 4,5m.

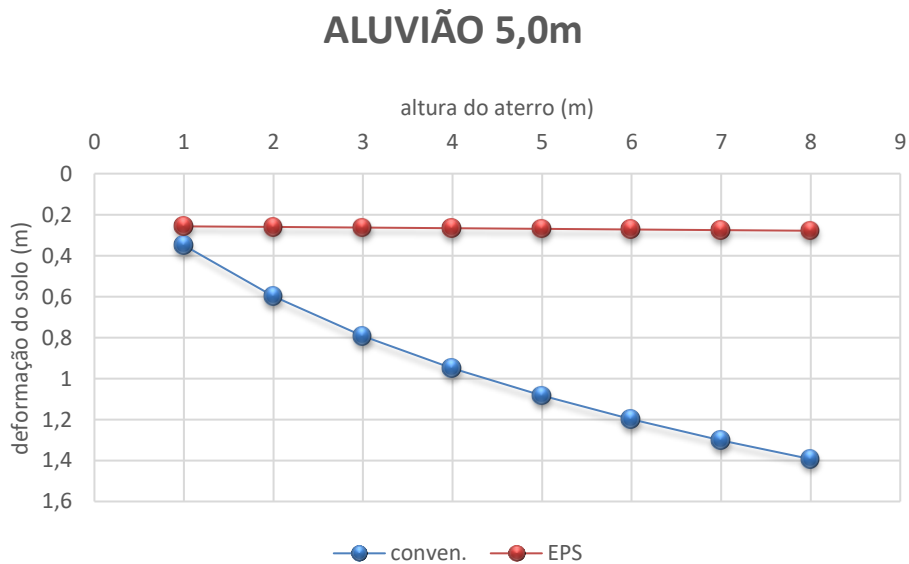
Figura 33: Gráfico comparativo - Aluvião 4,5m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 34 apresenta o gráfico comparativo de deformação de solo observadas num aterro de altura de um a oito metros, pra um aluvião de 5m.

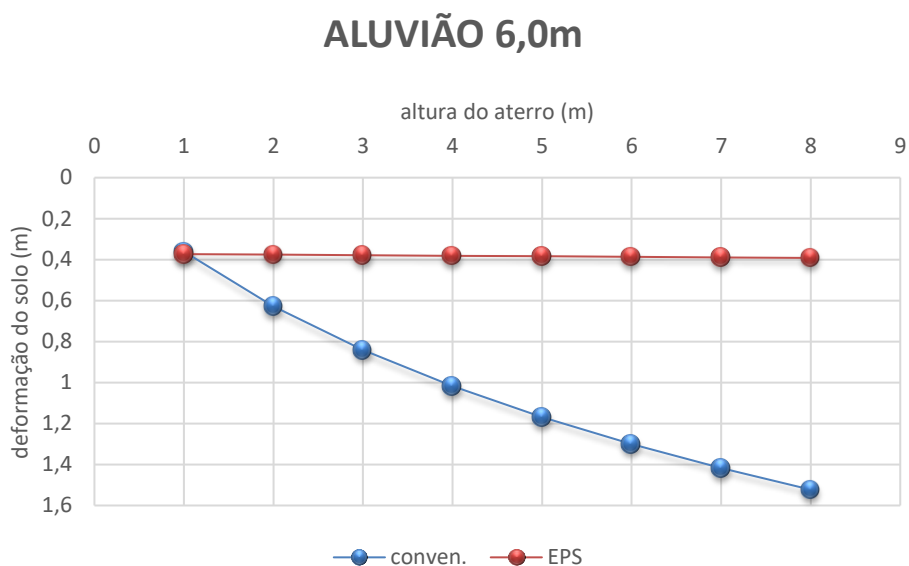
Figura 34: Gráfico comparativo - Aluvião 5m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 35 apresenta o gráfico comparativo de deformação de solo observadas num aterro de altura de um a oito metros, para um aluvião de 6m.

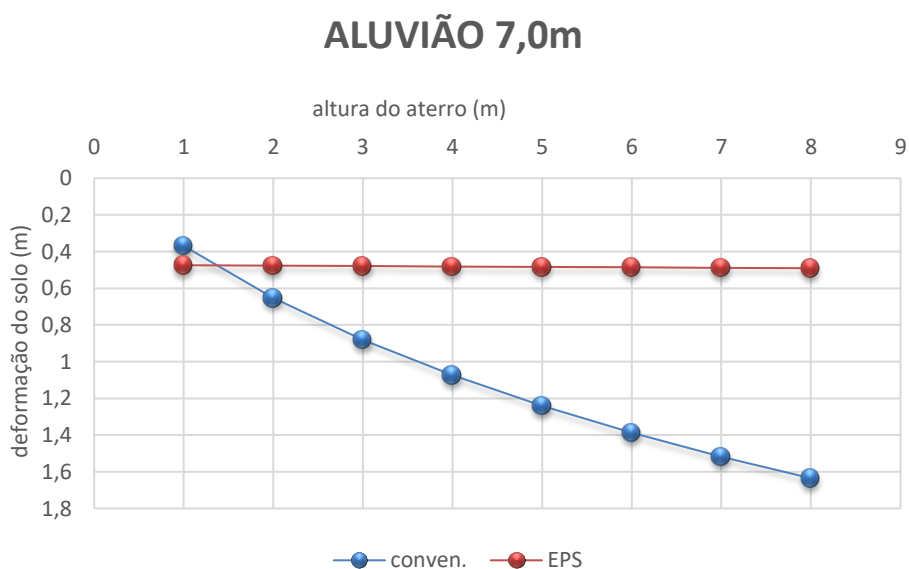
Figura 35: Gráfico comparativo - Aluvião 6m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 36 apresenta o gráfico comparativo de deformação de solo observadas num aterro de altura de um a oito metros, para um aluvião de 7m.

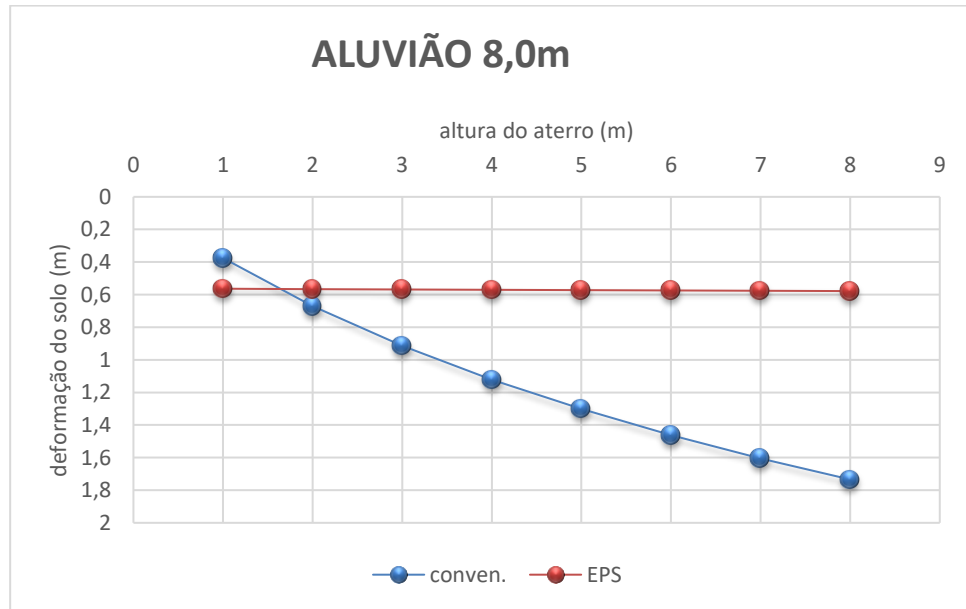
Figura 36: Gráfico comparativo - Aluvião 7m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 37 apresenta o gráfico comparativo de deformação de solo observadas num aterro de altura de um a oito metros, para um aluvião de 8m.

Figura 37:Gráfico comparativo - Aluvião 8m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 38 apresenta o gráfico comparativo de deformação de custo por metro cúbico em um aterro com a utilização de EPS e um aterro convencional.

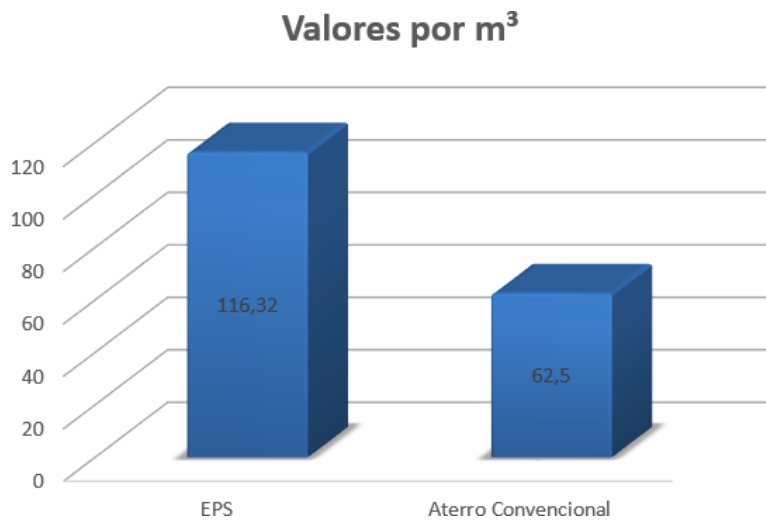


Figura 38: Valores comparativos de custo por m³.

Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível concluir, através dos cálculos e representações gráficas, que o aterro com a utilização de EPS apresenta maiores benefícios em relação ao aterro convencional, pois este apresenta dados de recalque menores a partir de uma certa altura, mantendo um valor de recalque aproximadamente constante, independente da altura do aterro.

Com relação aos custos, o EPS é cerca de 86% mais caro que a solução convencional, comparando os valores unitários diretamente, entretanto, não se deve esquecer que no aterro convencional o material recalado deverá ser repostado e esse acréscimo de sobrecarga também produziria novos custos que possivelmente chegariam próximo do valor unitário da solução com EPS.

5. CONCLUSÃO

Com o aumento da demanda de obras de infraestrutura localizadas sobre depósitos de argila mole, termo que se refere a solos saturados, são criadas novas soluções geotécnicas a fim de amenizar a problemática dos descolamentos. A alternativa exequível tema deste trabalho consistiu na utilização de blocos de EPS. Foi visto que o EPS, poliestireno expandido, é um material plástico celular que pode ser encontrado em diversas formas geométricas, apresentando utilização em variadas aplicações, seja na construção civil, na indústria automotiva ou em embalagens diversas.

Foram apresentados neste trabalho, através de revisões bibliográficas, os conceitos envolvendo a utilização de EPS, bem como material introdutório que possibilitou a compreensão do projeto de aterros.

Os resultados obtidos permitiram concluir que o emprego de blocos de EPS em aterros de solo mole, quando comparados ao método convencional, gera pequenos recalques, podendo, até mesmo, dependendo da situação, impedir a sua ocorrência. Do ponto de vista econômico, embora a solução com EPS apresente um custo maior, esse valor acaba se tornando equivalente ou inferior se for levado em conta que o aterro convencional tem custos adicionais de estrutura e manutenção durante sua vida útil.

Com base nas constatações acima, é possível concluir que o emprego de EPS em corpos de aterro sobre solo mole é uma alternativa viável para este tipo de situação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA E MARQUES 2014 - ALMEIDA, M. S. S.; MARQUES, M. E. S. **Aterro Sobre Solos Moles - Projeto e Desempenho**. 2o ed. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007**: Solo - Ensaio de adensamento unidimensional - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: Solo - Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7250**: Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos. Rio de Janeiro, 1982. 2ª edição.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8044**: Projeto Geotécnico – Procedimento. Rio de Janeiro, 2018.

AVESANI NETO 2009 - AVESANI NETO, J. O. **Caracterização do Comportamento Geotécnico do EPS Através de Ensaio Mecânicos e Hidráulicos**, 2009. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia. São Carlos.

BOWLES, J. E. **Foundations Analysis and Design** 2th Edition, MacGraw-Hill Book Co., New York, 1977.

CERNICA, John N. **Geotechnical Engineering: Soil Mechanics**. [S. l.]: John Wiley and Sons Ltd; International Ed edition, 1995. E-book.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson, 2007. 561 p.

DNIT - DNIT. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**. 2018. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/>>. Acesso em: 13 de abril de 2019.

MACCARINI 2017 - MACCARINI, M. **Projeto do Aterro de Encontro do Viaduto da Pista de Duplicação da BR-470**, na Interseção com a BR-101, com Utilização de EPS. Florianópolis, 2017.

MACCARINI, M. **Construção de Aterro Sobre Solos Moles com Utilização de EPS**. GEOSUL, p. 9, 2013. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC. Disponível em: <<https://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/geosul2013criciuma/2013-maccarini.pdf>>. Acesso em: 6 de maio de 2019.

MARANGON 2018 - MARANGON, M. **Investigação Geotécnica e Parâmetros Para Fundações**. Apostila do Curso de Geotecnia de Fundações e Obras de Terra, 2018. Juiz de Fora: UFJF. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/nugeo/pagina-do-aluno/notas-de-aula/geotecnia-defundacoes-e-obras-de-terra-20173/>>. Acesso em: 16 de abril de 2019.

MASSAD 2010 - MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2a ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

Ortigão e Collet (1987) *apud* Schnaid e Odebrecht (2012) - SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de Campo**. 2o ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SAKAMOTO 2018 - SAKAMOTO, M. Y. **Solução Geotécnica com Utilização de EPS em Aterros Sobre Solo Mole**, 2018. Florianópolis, Brasil: 200p. Monografia - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.