



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS CAMPINA GRANDE - PB

ATERROS SOBRE SOLOS MOLES: REVISÃO DE LITERATURA

Ana Carolina Cavalcanti Moraes

Orientador Interno: Prof. Dr. Ademir Montes Ferreira

Orientador Externo: Dr. Jonny Dantas Patricio

Campina Grande

2019

ANA CAROLINA CAVALCANTI MORAES

ATERROS SOBRE SOLOS MOLES: REVISÃO DE LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador Interno: Prof. Dr. Ademir Montes Ferreira

Orientador Externo: Dr. Jonny Dantas Patricio

CAMPINA GRANDE

2019

ANA CAROLINA CAVALCANTI MORAES

ATERROS SOBRE SOLOS MOLES: REVISÃO DE LITERATURA

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ademir Montes Ferreira

(Orientador – Universidade Federal de Campina Grande)

Dr. Jonny Dantas Patrício

(Coorientador - Universidade Federal de Campina Grande)

Prof. Dra. Carina Silvani

(Examinador interno -Universidade Federal de Campina Grande)

MSc. Pablio da Silva Araújo

(Examinador externo- Centro Universitário Maurício de Nassau)

CAMPINA GRANDE

2019

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Joselito e Tereza Paula, e ao meu irmãozinho Théo,
os maiores amores da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Mestre Jesus por me conduzir até aqui e por ter me amparado diante de tantos obstáculos, me dando forças para seguir sempre em frente.

Aos meus pais Joselito e Paula, por todo o suporte dado, amor incondicional, paciência e amizade - minhas grandes inspirações.

Ao meu amado irmão Théo, que sempre me traz alegria com sua pureza, e por me fazer querer ser alguém melhor todos os dias.

Ao meu querido namorado João, pela compreensão, encorajamento, carinho e companheirismo presente em todos os momentos.

Às minhas adoradas tias Lúcia, Martha e Aninha, por todo o amor e apoio que sempre me dedicaram em todos os momentos, e às minhas primas/irmãs Cecília e Natália, por me incentivarem à sua maneira.

À minha madrastra e meu padrasto, Flávia e Eduardo, por sempre acreditarem em mim.

À Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao professor e orientador Ademir Montes Ferreira, por ter me conduzido ao interesse pela área de geotecnia oferecendo a oportunidade de me aprofundar em um tema tão vasto. Ao co-orientador Jonny Dantas Patrício, pela orientação, paciência, ensinamentos e envolvimento demonstrados ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Aos meus grandes amigos, Camila, Adrielle e Erivan que tive a oportunidade de conhecer durante o período universitário e que quero levar para toda a vida. E aos demais amigos e colegas que estiveram presentes ao longo do curso.

À minha amiga Iasmin, pela amizade ao longo destes anos e também, por me apoiar em todos os momentos.

A todos os professores que me transmitiram seus preciosos conhecimentos ao longo de todo o curso de Engenharia Civil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Geologia do território Brasileiro.....	7
Figura 2 – Equipamento para o ensaio de palheta.....	9
Figura 3 – Ponteira de piezocone	11
Figura 4 – Rupturas de aterros sobre solos moles.....	14
Figura 5 – Instalação do sistema de medição de inclinação.....	15
Figura 6 - Métodos construtivos de aterros sobre solos moles.....	16
Figura 7 - Uso de EPS na rota das bandeiras, Jundiaí, SP.....	18
Figura 8 – Uso de EPS na rota das bandeiras, Jundiaí, SP.....	18
Figura 9 - Esquema simplificado de uma coluna de brita.....	19
Figura 10 - Sequência Executiva de Colunas de Brita	20
Figura 11 - Execução de um aterro com técnica DSM.....	21
Figura 12 – Sequência de colocação de geodrenos	22
Figura 13 - Tratamento de fundação com geodreno e sobrecarga temporária.....	23
Figura 14 – Exemplos de materiais geossintéticos.....	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sensibilidade das argilas.	10
Tabela 2 - Tipos de Geossintéticos e suas principais aplicações.....	25
Tabela 3 - Resumo das aplicações dos geossintéticos e objetivos.	25

“Ser ou não ser, eis a questão: será mais nobre

Em nosso espírito sofrer pedras e setas

Com que a Fortuna, enfurecida, nos alveja,

Ou insurgir-nos contra um mar de provações

E em luta pôr-lhes fim? (...)”

Hamlet, William Shakespeare

RESUMO

A engenharia civil sempre enfrentou desafios quando se trata da execução de obras sobre solos moles, que possuem baixa resistência e que estão sujeitos à ação de recalques prolongados, necessitando sempre de análises e estudos criteriosos. Este estudo tem como principal objetivo realizar revisão bibliográfica sobre aterros sobre solos moles, suas características principais, e ainda algumas possíveis soluções (aterros leves, *deep soil mixing* e geossintéticos, e outros) para a correção das condições originais dos solos moles. Ao longo do trabalho é possível concluir que os aterros sobre solos moles podem ser executados com eficiência e ser bem-sucedidos em construções rodoviárias, desde que o comportamento destes solos seja bem analisado com relação à sua estabilidade, possibilidade de recalques e resistência ao cisalhamento.

PALAVRAS-CHAVE: solos moles; rodovias sobre solos moles;

ABSTRACT

Civil engineering has always faced challenges when it comes to the execution of works on soft soils, which have low resistance and that are subject to the action of prolonged settlement, always requiring more careful analysis and studies. The main objective of this study is to carry out a literature review on landfills on soft soils, their main characteristics, and some possible solutions (expanded polystyrene, deep soil mixing, geosynthetics and others) to correct the original soft soil conditions. It is possible to conclude that landfills on soft soils can be performed efficiently and be successful in road construction, provided that the behavior of these soils is well analyzed with respect to their stability, possibility of settling and shear strength.

KEYWORDS: soft soils, highways on soft soils.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	2
1.1. JUSTIFICATIVA	3
1.2. OBJETIVOS	4
1.2.1. Objetivo Geral	4
1.2.2. Objetivos Específicos	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1. Aspectos Geológicos e Antropológicos	5
2.2.1. Ensaio de Palheta	8
2.3. Análise de recalques	11
2.3.1. Recalque imediato	12
2.3.2. Recalque por adensamento primário	13
2.4. Resistência ao cisalhamento	13
2.4.1. Monitoramento de taludes com inclinômetros	14
2.5. Construção de aterros sobre solos moles	15
2.5.1. Aterros Leves com utilização de poliestireno expandido	16
2.5.2. Colunas de Brita	18
2.5.3. Colunas de Solo-Cimento	20
2.5.4. Geodrenos	22
2.5.5. Reforços dos solos com Geossintéticos	23
3.0. MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.0. RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1. Aterros leves com uso de poliestireno expandido	27
4.2. Geossintéticos e Geodrenos	29
4.3. Colunas de solo-cimento (DSM):	31
5.0. CONCLUSÃO	34
6.0. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e econômico do Brasil ao longo dos últimos anos tem implicado no desenvolvimento da infraestrutura e, devido a estes fatores, a necessidade da implantação de rodovias, aterros e barragens teve um aumento considerável (MASSOCCO, 2017).

Um dos maiores desafios na engenharia civil é a implantação de obras sobre solos com pouca resistência, como solos moles, por exemplo, que são compressíveis e por estarem sujeitos a prolongados recalques merecem um estudo criterioso (MASSOCCO, 2017).

Neste contexto, surgem diversas soluções, como por exemplo, os aterros construídos com reforços, principalmente os geossintéticos, que compõem uma das soluções mais utilizadas mundialmente para a melhoria da estabilidade e para permitir uma condição de construção mais controlada de aterros sobre solos moles. Países da Europa e do sudeste da Ásia bem como os Estados Unidos, já vêm se utilizando desta solução há algumas décadas. (OLIVEIRA, 2006)

Para a construção de aterros sobre solos moles o engenheiro necessita de uma série de conhecimentos técnicos que envolvem tanto as fases de investigação do terreno e de elaboração do projeto geotécnico propriamente dito, assim como as de execução e de controle de obra. O conhecimento do perfil do subsolo ao longo das áreas selecionadas, bem como das características e dos parâmetros de compressibilidade e resistência ao cisalhamento das camadas de solos moles, é condição fundamental para o desenvolvimento dos projetos. (MARANGON, 2009)

Desta maneira, este trabalho tem por objetivo realizar estudo bibliográfico sobre soluções de aterros sobre solos moles com enfoque em obras de infraestrutura de transporte tendo em vista o cenário de expansão da malha rodoviária no Brasil.

1.1. JUSTIFICATIVA

Segundo Thomé (1994), é possível encontrar na natureza alguns solos que são compostos por materiais com baixa capacidade de suporte e grande deformabilidade volumétrica. Como por exemplo, os solos moles, que ocorrem em depósitos localizados em regiões de depressões e planícies.

Apesar destas condições citadas anteriormente, devido ao grande crescimento dos centros urbanos, a construção sobre solos moles se apresenta como um problema real, dada a necessidade de construir novas infraestruturas urbanas e de transporte (SANTOS *et al.*, 2018).

Depósitos de solos moles têm como principais aspectos a sua baixa resistência e permeabilidade, e alta deformabilidade. Desta forma, é necessário avaliar os fatores de segurança durante e após a construção de um aterro neste tipo de terreno, já que, nessas fases, o carregamento é máximo, no entanto, a resistência do solo de fundação é mínima, devido ao excesso de poro-pressão (MORAES, 2002).

A eficiência de uma previsão relaciona-se aos métodos de análise empregados e à determinação correta dos parâmetros geotécnicos do solo a adotar neste estudo. Portanto, é importante que na construção de um aterro sobre solo mole seja proporcionada a segurança adequada de acordo com a possibilidade de ruptura do solo e que apresente também deslocamentos totais ou diferenças compatíveis com o caráter rodoviário da obra, durante e depois da sua construção (DOMINONI, 2011).

1.2.OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo principal realizar estudo de revisão de literatura sobre aterros sobre solos moles.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Entender de maneira geral os aspectos considerados no estudo de aterro sobre solos moles;
- Avaliar tecnicamente soluções de aterro sobre solos moles estudadas nos últimos anos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste subitem é apresentada a fundamentação teórica sobre o tema de aterros sobre solos moles.

2.1. Aspectos Geológicos e Antropológicos

As transgressões do mar que ocorreram no Holoceno e Pleistoceno, no período Quaternário, acarretaram o transporte e a deposição de sedimentos marinhos ao longo da costa brasileira. O material sedimentado é caracterizado como compressível e, assim, sensível à aplicação de carregamentos. Com desempenhos equivalentes, há também, os solos de baixa consistência provenientes de várzeas de rios, devido à sedimentação de material fino em áreas de baixa velocidade de fluxo (SANTOS, 2015).

A Figura 01, na página 07, mostra os aspectos geológicos do solo brasileiro e a localização dos sedimentos holocênicos citados anteriormente.

É notável que o crescimento populacional e de infraestrutura alcançado nas últimas décadas no Brasil implicou em uma escassez cada vez maior de subsolos adequados à construção nas proximidades das cidades e junto às principais rotas rodoviárias, obrigando a população a ocupar áreas antes consideradas inadequadas para receber obras de infraestrutura urbana e principalmente de transportes (OLIVEIRA, 2006).

A tentativa de melhoramento dos solos e do seu desempenho nas suas várias aplicações em estruturas antropogênicas remonta de muitos séculos atrás. Diversos esforços foram sendo realizados para que esse melhoramento pudesse ser executado da melhor forma possível e de uma maneira econômica (SOUSA, 2014).

Grandes cidades brasileiras localizam-se junto à costa, na planície costeira ou às margens de grandes rios. A construção da infraestrutura urbana e de transporte sempre tentou evitar os depósitos de argilas moles por causa das dificuldades que estão envolvidas na utilização deste tipo de solo como fundação de estradas e edificações (OLIVEIRA, 2006).

Há depósitos de solos moles em todo o território brasileiro, sendo mais frequente na região litorânea, mas também ocorre em ambientes lacustres, não marinhos. As argilas da Baixada Santista e do Rio de Janeiro foram mais estudadas devido à ocupação maior

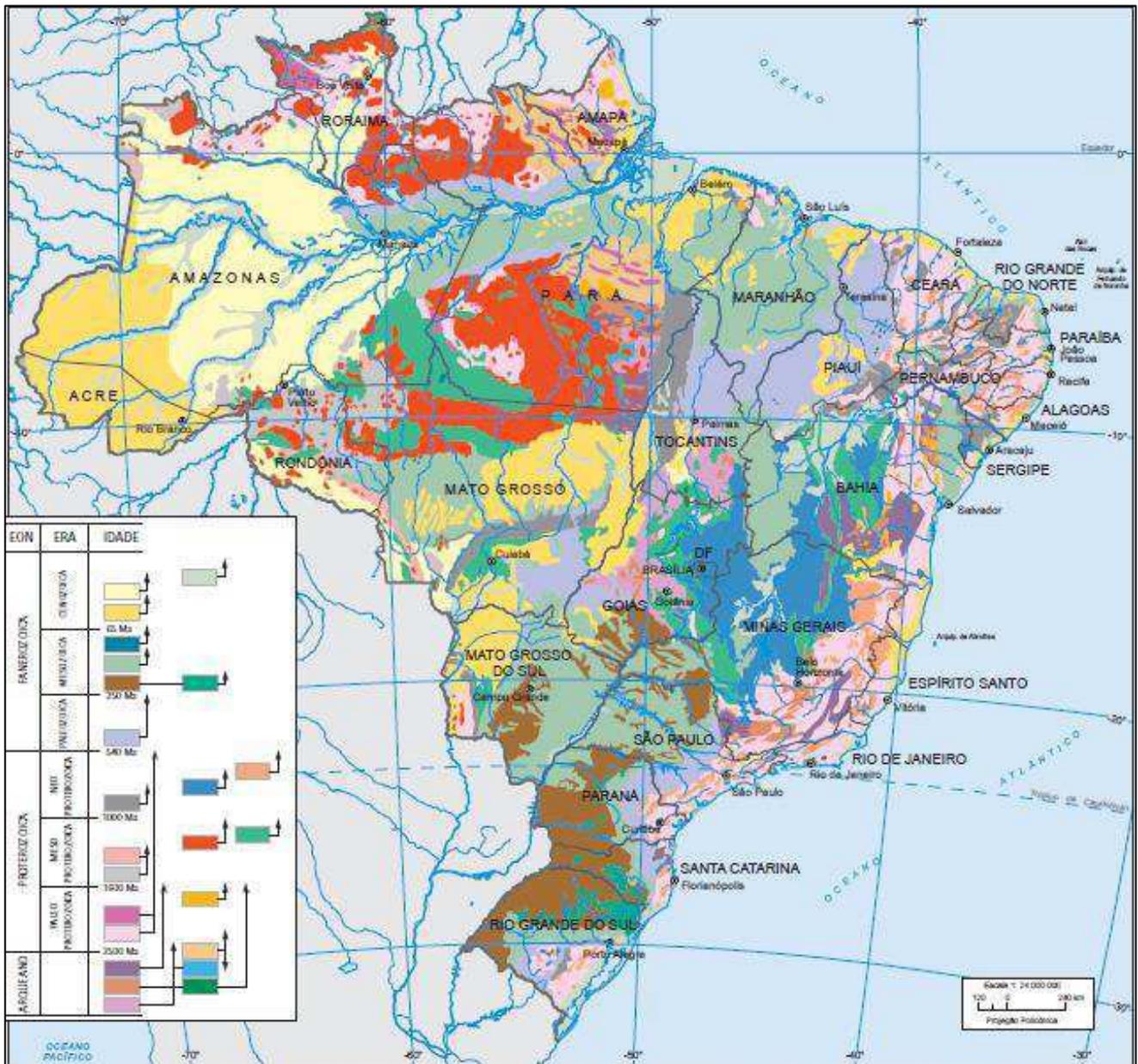
e mais antiga nesta área, no entanto há também estudos nas regiões Nordeste, Sul e Centro Oeste do país (FUTAI, 2010).

O termo “solos mole” é genericamente empregado para descrever depósitos de solos com características de alta plasticidade e compressibilidade; de composição orgânica-mineral, com quantidades variáveis de matéria orgânica (15 a 99%). Essa composição pode ser decorrente de apenas uma fonte de origem ou de uma combinação de fontes, devido a processos climáticos favoráveis de humificação, mineralização e pedogênese, sob condições predominantemente anaeróbicas e de topografias particulares (DNER, 1990 apud SAKAMOTO, 2018).

Em geral, os solos moles são argilas moles ou areias argilosas fofas de deposição recente, isto é, formadas durante o período Quaternário. As origens dos solos moles podem variar consideravelmente, desde o fluvial até o costeiro. Eles podem se diferenciar pelo meio de deposição (água doce, salgada ou salobra); pelo processo de deposição (fluvial ou marinho) ou ainda pelo local de deposição (várzea ou planícies de canais de mar, praias, inundação, etc.) (SGARBI et al., 2011).

As argilas moles se caracterizam por possuírem uma resistência não drenada menor que 25 kPa ou, índice de consistência menor que 0,5 ou ainda N_{SPT} menor que 2. No entanto, é usual se deparar com depósitos de solo muito moles com N_{SPT} igual zero ou onde o amostrador desce com o peso próprio da composição. Quando isto acontece, torna-se complicado definir algum parâmetro do solo apenas com uma sondagem de simples reconhecimento e, geralmente a designação de argilas moles ou solos moles é empregada de maneira genérica e sem prezar pelos verdadeiros aspectos geotécnicos do solo (FUTAI, 2010).

Figura 1- Geologia do território Brasileiro.



Fonte: IBGE, Geologia do Brasil - 2010

2.2. Análise da estabilidade

O desempenho dos solos saturados é determinado de acordo com as tensões efetivas a que estiverem subordinados. Estas tensões efetivas demonstram as forças que são transmitidas de grão a grão, que resultam nas deformações do solo e na mobilização da resistência, e para conhecer essas tensões é necessário conhecer as poropressões resultantes do nível da água e do próprio carregamento. Como esta determinação pode ser muito complicada, realiza-se com maior frequência a análise da estabilidade em termos das tensões totais atuantes (BELLO, 2004).

Os procedimentos para estudo da estabilidade mais comumente utilizados para avaliação de aterros sobre solos moles se baseiam na suposição de haver equilíbrio em uma massa de solo, admitida como corpo rígido-plástico, na iminência de entrar em um processo de escorregamento. São exemplos de métodos para avaliação da estabilidade de um solo: círculo de atrito, cunha, Fellenius, Bishop simplificado e Morgenstern-Price. (MASSOCCO, 2017)

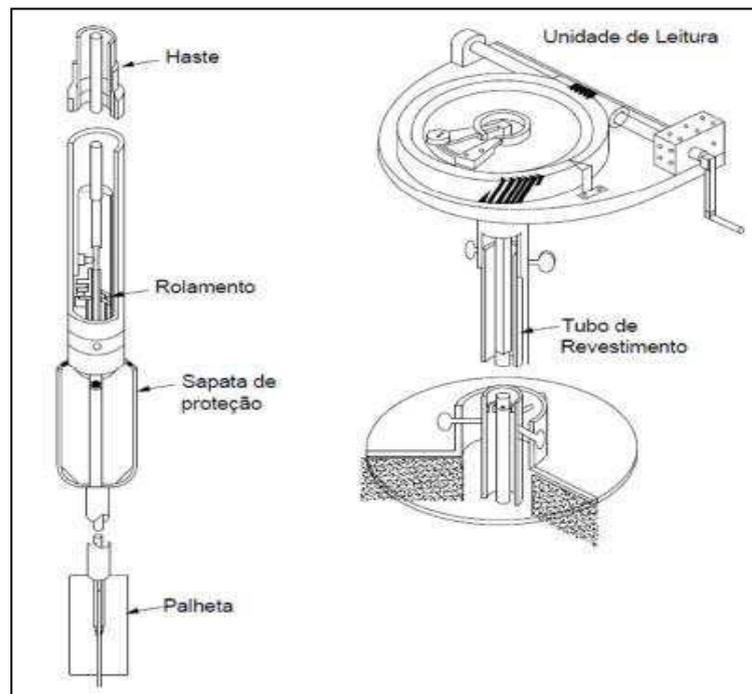
As análises da estabilidade de aterros sobre argila mole saturada consideram a argila em seu comportamento não drenado, e então o estudo é feito baseando-se em tensões totais, já que as poropressões geradas na camada de argila mole são desconhecidas. Em termos de tensões totais a análise pode ser denominada também como análise da envoltória de resistência horizontal e o valor da resistência não drenada (S_u) da camada de argila é crucial para o cálculo da estabilidade (DOMINONI, 2011).

Segundo Dominoni (2011), para aterros em solo mole, o ensaio de campo mais utilizado para a determinação de (S_u) é o ensaio de palheta mostrado a seguir (item 2.2.1).

2.2.1. Ensaio de Palheta

O ensaio de palheta ou *Vane Test* é o mais utilizado para a obtenção da resistência não drenada (S_u) do solo mole, consistindo na rotação constante de 6° por minuto de uma palheta cruciforme (Figura 02) em profundidades predefinidas (ALMEIDA e MARQUES, 2014). Durante a realização do ensaio, são feitas leituras de rotação a cada 2 graus para determinar a curva torque x rotação (DOMINONI, 2011).

Figura 2 – Equipamento para o ensaio de palheta.



Fonte: (DOMINONI, 2011)

Segundo Dominoni (2011), através do torque máximo obtêm-se o valor de resistência não drenada do terreno, nas condições de solo natural indeformado. A equação (01) utilizada para o cálculo de S_u , conforme NBR 10905 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1989), é:

$$S_u = \frac{0,86 \times T}{\pi \times D^3} \quad (\text{Equação 01})$$

Onde:

S_u : resistência não drenada na condição natural (kN/m^2);

D : diâmetro da palheta (m);

T : torque máximo medido no ensaio (kN.m).

A equação anterior também é empregada no cálculo da resistência amolgada da argila (S_{ua}), gira-se a palheta rapidamente por 10 voltas consecutivas de forma a amolgar o solo. (ALMEIDA e MARQUES, 2014).

De acordo com Dominoni (2011) a partir dos resultados do ensaio na condição natural e na condição amolgada, é possível avaliar a sensibilidade da estrutura de formação natural do depósito argiloso através da equação (02):

$$S_t = \frac{S_u}{S_{ua}} \quad (\text{Equação 02})$$

Onde:

S_t : sensibilidade da argila;

S_{ua} : resistência não drenada na condição amolgada.

A Tabela 01 a seguir demonstra a sensibilidade das argilas segundo o valor de S_t .

Tabela 1 - Sensibilidade das argilas.

Sensibilidade	S_t
Baixa	2 - 4
Média	4 - 8
Alta	8 - 16
Muito Alta	>16

Fonte: (DOMINONI, 2011)

Finalmente, segundo Almeida e Marques (2014), a resistência não drenada S_u medida no ensaio de palheta deve ser corrigida por um fator de correção (μ) que é função do índice de plasticidade da argila e que considera a anisotropia e a diferença entre as velocidades de carregamento em campo e do ensaio de palheta, de forma a se obter a resistência de projeto.

$$S_u(\text{projeto}) = \mu \cdot S_u(\text{palheta}) \quad (\text{Equação 03})$$

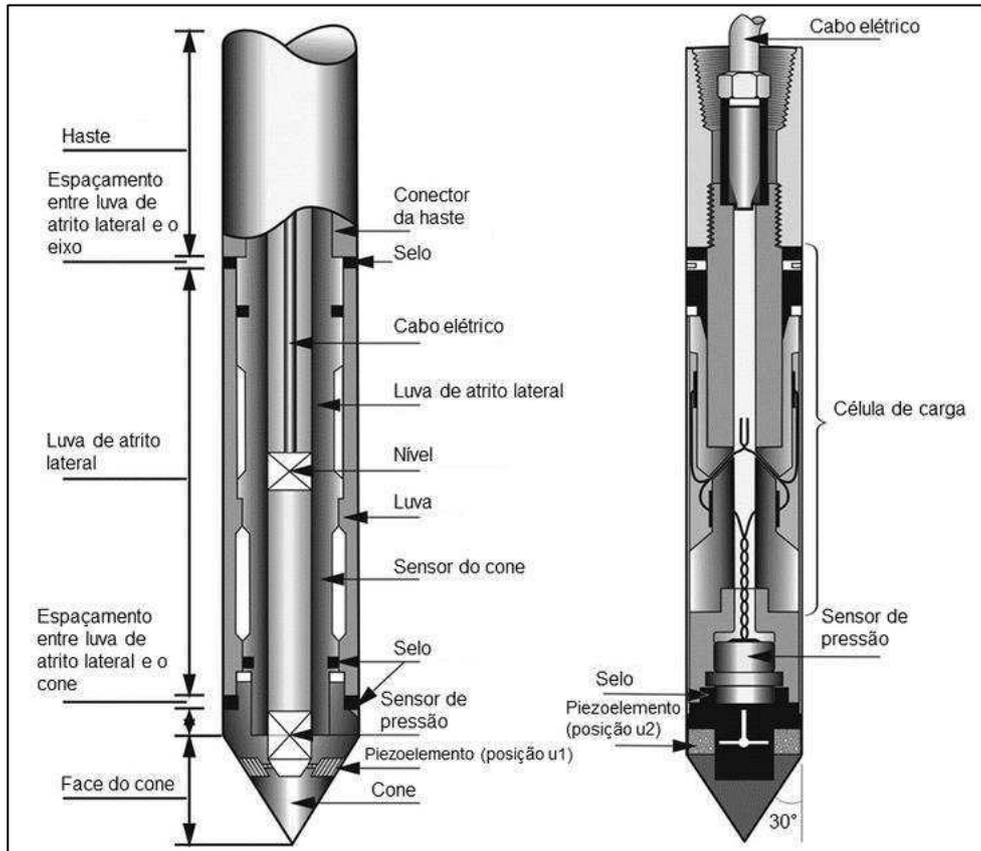
2.2.2. Ensaio de Piezocone (CPTU)

Segundo Dominoni (2011), o ensaio de piezocone ou CPTU é feito através da cravação de uma ponteira cônica (figura 03) de maneira contínua e constante com uma velocidade de 2,0 cm/s, feito com o auxílio de um penetrômetro hidráulico e hastes metálicas padronizadas. As poropressões são lidas através de um elemento poroso situado na base do cone, saturado com o auxílio de bomba a vácuo e óleo de silicone. Durante o ensaio, podem ser realizados ensaios de dissipação da pressão neutra.

Além dos dados lidos em tempo real durante a cravação, o ensaio de piezocone tem sido utilizado para a classificação dos solos, estimativa do comportamento típico dos solos, definição da estratigrafia de depósito de solo mole, definição do perfil contínuo de resistência não drenada (S_u) e obtenção dos coeficientes de adensamento do solo

(c_h e c_v). Através desse ensaio, também é possível estimar a razão de sobreadensamento (OCR), o coeficiente de empuxo no repouso (K_0), o módulo de deformabilidade oedométrica (E_{oed}) e a sensibilidade da argila (S_t) (ALMEIDA e MARQUES, 2014).

Figura 3 – Ponteira de piezocone



Fonte: (SCHNAID, 2009)

2.3. Análise de recalques

De acordo com a norma de projeto de aterro sobre solos moles para obras viárias do DNER (1998), os estudos de recalques visam estimar seu valor total após a construção e a velocidade de recalque ou a estimativa da curva tempo-recalque. Com estas estimativas permite-se:

- Escolher o método construtivo mais econômico e mais prático com o objetivo de manter dentro de limites aceitáveis os recalques pós-construtivos;
- Evitar trabalhos de reparação pós-construtivos no pavimento causado por recalques.

Segundo Monteiro (2018), ao ser submetida a um incremento de tensão, uma camada de solo saturado tem a poropressão da água aumentada simultaneamente. Assim, a drenagem se dá por meio dos vazios existentes na massa de solo, implicando em uma redução volumétrica. Em solos granulares, esse processo ocorre mais rapidamente, o que se explica por sua alta permeabilidade. Em se tratando das argilas, pouco permeáveis, esse processo pode demorar um tempo considerável para acontecer.

Desta maneira, é possível subdividir o recalque do solo causado pela aplicação de cargas em três categorias (DAS, 2014):

a) Recalque elástico ou imediato (Δh_i): deslocamento gerado pela deformação elástica do solo, sem alteração do seu teor de umidade;

b) Recalque por adensamento primário (Δh_p): variação do volume em solos coesivos saturados devido a expulsão da água de seus vazios;

c) Recalque por compressão secundária (Δh_s): ocorre em solos coesivos saturados, após a dissipação das poropressões, quando as tensões efetivas são estabilizadas. É resultado do ajuste plástico da estrutura de solo, ou seja, de deformações lentas devido ao seu comportamento viscoso.

Assim, o recalque total gerado por incrementos de tensão pode ser determinado por meio da equação (04).

$$\Delta h_t = \Delta h_i + \Delta h_p + \Delta h_s \quad (\text{Equação 04})$$

2.3.1. Recalque imediato

A deformação dos solos ocasiona recalques elásticos ou imediatos, sem qualquer mudança no teor de umidade. Geralmente estas ocorrem logo após ou simultaneamente à aplicação do carregamento e ocorrem a velocidade em função do tipo de solo (BRANDI, 2004).

Em geral, o recalque imediato Δh_i é de pequena magnitude, quando comparado ao recalque por adensamento Δh_s , especialmente em aterros de grande dimensão. (ALMEIDA e MARQUES, 2014).

2.3.2. Recalque por adensamento primário

Segundo Brandi (2004), quando se procura avaliar a magnitude dos recalques por adensamento ocorridos em uma determinada formação, condições relacionadas ao seu estado temporal de tensão efetiva devem ser identificadas.

A equação (05) para o cálculo do recalque por adensamento primário de uma camada de argila de espessura h_{arg} , com tensão efetiva vertical in situ σ'_{vo} e tensão de sobreadensamento σ'_{vm} , deduzida pelo método de Pacheco e Silva (1970) para parâmetros de compressibilidade, é (ALMEIDA e MARQUES, 2014):

$$\Delta h = h_{arg} \left[\frac{C_s}{1+e_{vo}} \cdot \log \left(\frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{vo}} \right) + \frac{C_c}{1+e_{vo}} \log \left(\frac{(\sigma'_{vo} + \sigma_v)}{\sigma'_{vm}} \right) \right] \text{ (Equação 05)}$$

Onde C_s e C_c são os índices de recompressão e compressão; e_{vo} o índice de vazios in situ para a profundidade adotada.

Ainda segundo Almeida e Marques (2014), o acréscimo de tensão devido à carga, $\Delta\sigma_v$, é calculado conforme a geometria do problema em questão.

2.3.3. Recalque por compressão secundária

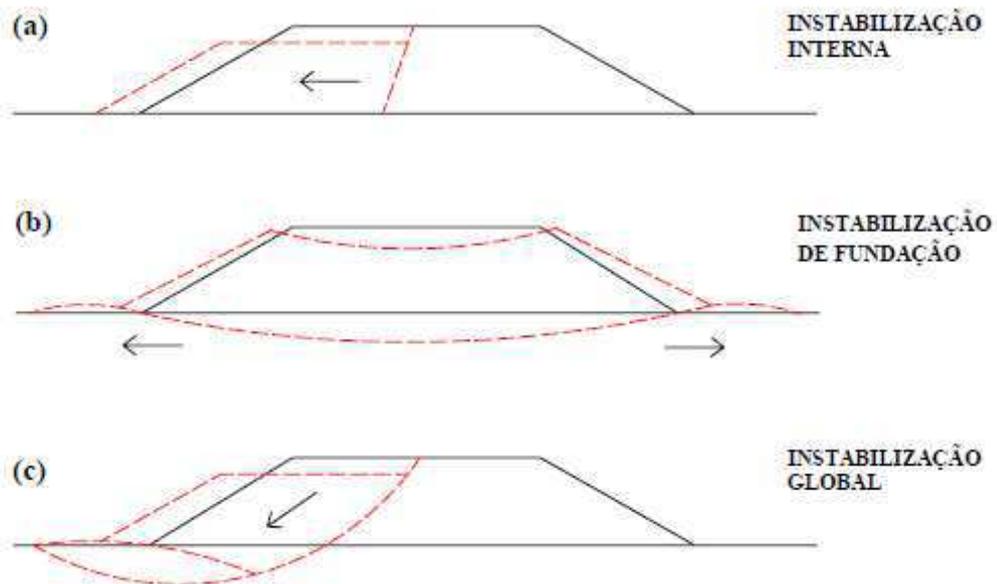
Uma vez definido como o recalque se desenvolve ao longo do tempo, é fundamental conhecer o valor do recalque final (ao final do adensamento secundário) e a relação entre o recalque primário e o secundário. Alguns ensaios de laboratório de longa duração têm sido realizados para estudar o adensamento secundário. Esses estudos são importantes para entender o comportamento, entretanto, inviáveis para fins de projeto corriqueiros. Não seria possível esperar meses ou anos para se obter parâmetros de adensamento secundário para execução de uma obra convencional (FUTAI, 2010).

2.4. Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento dos solos em geral é tida como a principal propriedade a determinar, provavelmente por estar associada aos casos de ruptura das obras (Figura 04) (capacidade de carga, estabilidade, segurança). No entanto, a deformabilidade dos solos normalmente é um fator determinante para projeto, apesar de

que o estado limite de serviço da obra pode ser alcançado antes do estado limite último. Por exemplo: escavações subterrâneas, que podem implicar em danos inaceitáveis às estruturas na superfície (JR.; FUTAI; ABRAMENTO, 2009).

Figura 4 – Rupturas de aterros sobre solos moles.



Fonte: (JEWELL, 1982 apud BELLO, 2004)

A resistência ao cisalhamento dos solos ocorre como consequência do atrito entre as partículas constituintes e das interações de partículas de defasagem de cargas elétricas, podendo originar uma resistência independente da coesão do solo (PENHA, 1999).

Muitos são fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento das argilas moles, dentre os quais, a sua plasticidade, a baixa permeabilidade e elevada compressibilidade. A resistência da argila saturada sofre ainda influência das condições de drenagem, amolgamento (mudança na tensão efetiva ou perda de cimentação), tensão de pré-adensamento e efeitos de rastejo (PENHA, 1999).

2.4.1. Monitoramento de taludes com inclinômetros

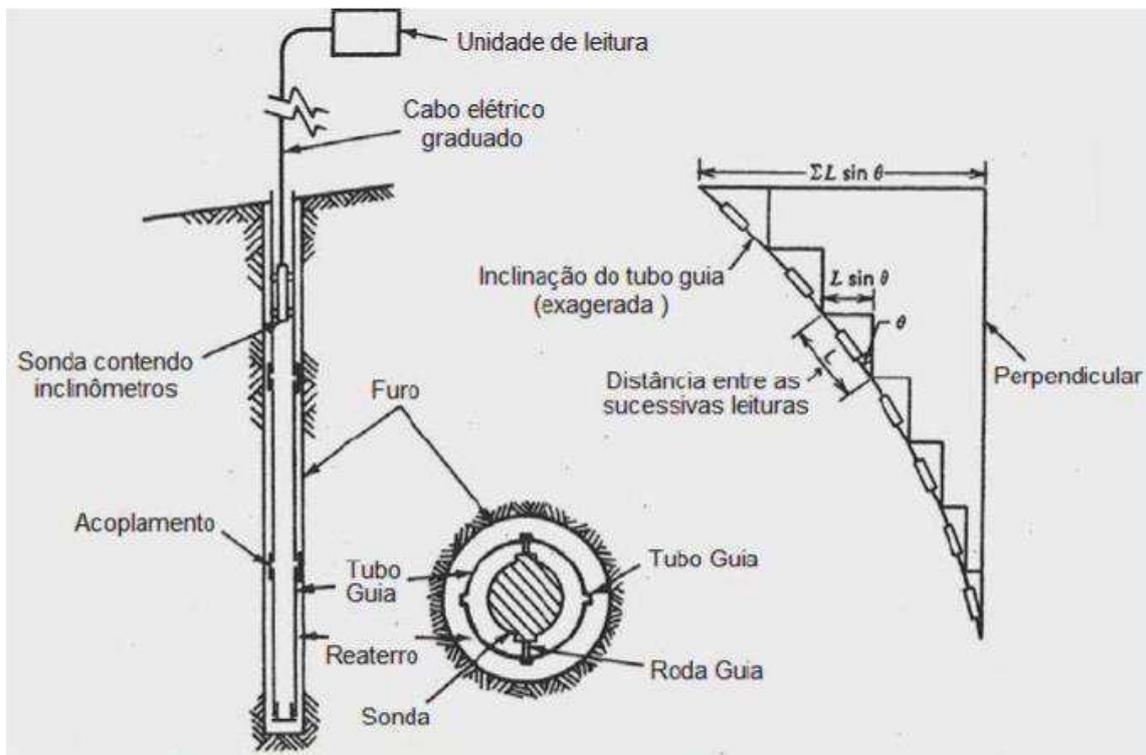
Segundo Pitol (2017), os inclinômetros são equipamentos desenvolvidos para a mensuração de ângulos de inclinação, elevação ou depressão de um objeto em relação à gravidade. O princípio do seu funcionamento se deve à criação de um plano horizontal

artificial, que serve como base para o cálculo da inclinação do componente em relação a este plano.

Para o monitoramento de taludes, o inclinômetro (figura 05) deve ser dotado de uma sonda como elemento sensor, cabo de intercomunicação entre a sonda e a unidade de aquisição de dados, e também o demonstrativo da forma de mensuração das informações do ângulo de inclinação (PITOL, 2017).

A sonda do inclinômetro é baixada e levantada dentro do tubo guia suspenso pelo cabo marcado, assim o registro de mudança de inclinação ao longo do tubo guia é monitorado na superfície (PITOL, 2017).

Figura 5 – Instalação do sistema de medição de inclinação.



Fonte: (PITOL, 2017)

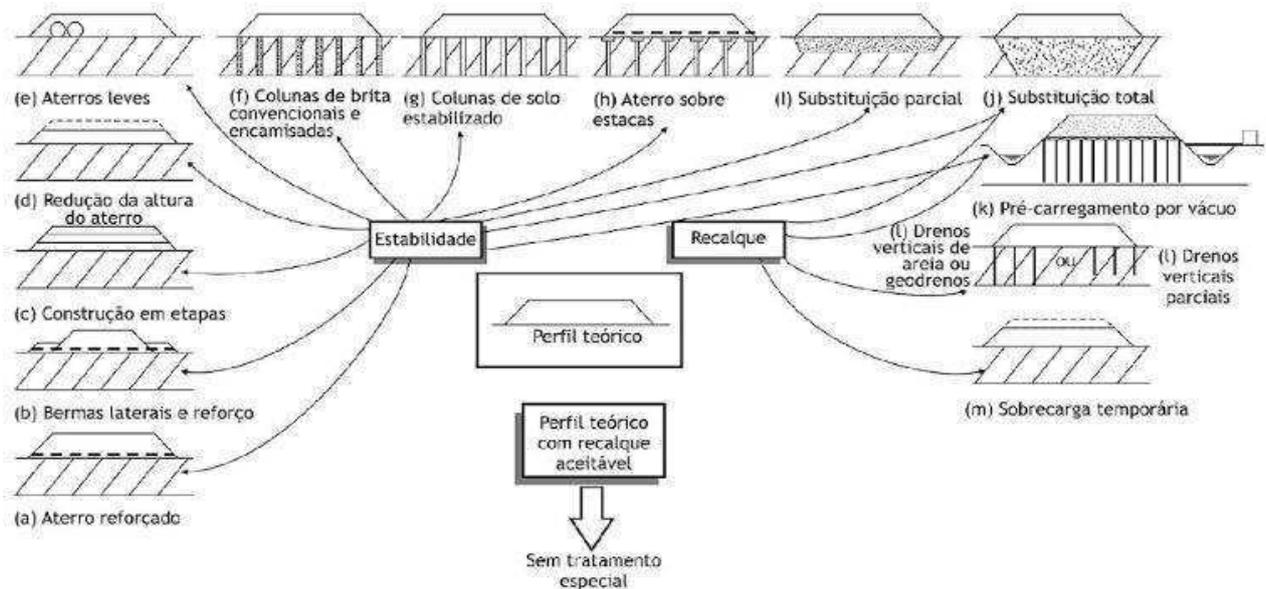
2.5. Construção de aterros sobre solos moles

As análises geotécnicas de campo devem prever a definição e o detalhamento dos perfis geotécnicos longitudinal e transversais em torno dos trechos de interesse, permitindo o desenvolvimento das soluções de projeto apropriadas a cada caso. Depois da constatação, nas análises geológicas, de afloramento desses sedimentos de alta

compressibilidade, ou da possibilidade de sua ocorrência em profundidade, as investigações a serem realizadas podem ser programadas (MARANGON, 2009).

A Figura 04 apresenta alguns dos principais métodos construtivos de aterros sobre solos moles.

Figura 6 - Métodos construtivos de aterros sobre solos moles.



Fonte: (Leroueil,1997 apud Futai, 2010)

De acordo com Santos *et al.* (2018), utilizar dos solos moles como fundação de obras de terra torna necessário melhorar ou ajustar algumas de suas principais características, como a baixa capacidade de resistência e a alta deformabilidade. Assim, para tornar viável a construção de aterros em regiões que podem ser caracterizadas pela ocorrência destes materiais, desenvolveu-se técnicas de tratamento e melhoramento dos solos.

A seguir apresentam-se algumas técnicas que são comumente utilizadas na construção de aterros sobre solos moles.

2.5.1. Aterros Leves com utilização de poliestireno expandido

A intensidade dos recalques primários dos aterros sobre camadas de solos moles é função do acréscimo de tensão vertical ocasionado pelo aterro construído sobre a camada de solo mole. Logo a utilização de materiais leves no corpo de aterro diminui a

magnitude desses recalques (ALMEIDA e MARQUES, 2014), como por exemplo o poliestireno expandido ou EPS (isopor ou similar).

O EPS é um elemento leve que é usado para muitas aplicações de engenharia civil, por exemplo, inclusões compressíveis, amortecedores sísmicos, aterros leves, aterros ferroviários, isolamentos de vibração do solo e proteções de dutos contra terremotos. (AKAY *et al.*, 2013)

Segundo Valerim Jr. (2010 apud SAKAMOTO, 2018) a utilização de EPS em aterros sobre solos moles é vantajosa já que estes são materiais leves, que permitem um aterro de peso específico mais baixo que o tradicional e conseqüentemente geram um menor carregamento no terreno; possuem resistência mecânica considerável, pouca absorção de água e manutenção das características mecânicas ainda que em presença de umidade, tornando esse material satisfatório para a finalidade em questão; tem fácil trabalhabilidade e manuseio em obra, como também a possibilidade de fabricação de peças de diferentes tamanhos e formatos que se adequem ao projeto; as propriedades do material se mantêm ao longo do tempo, resistência a fungos e outros microrganismos, tornando a vida útil compatível com a vida útil das obras nas quais pretende-se inseri-lo.

No entanto, a sua principal desvantagem consiste em: se a região do aterro for suscetível de alagamentos, o EPS estará sujeito a flutuar e prejudicar a integridade do aterro. Em casos assim, a base deverá ser instalada acima do nível da água (ALMEIDA e MARQUES, 2014).

De acordo com Maccarini (2013), em relação à modelagem dos esforços para análise da estabilidade contra a ruptura por cisalhamento, há duas correntes: uma que considera nos cálculos a resistência do EPS e outra, que modela o sistema pavimento - solo - EPS e alguma carga adicional, puramente como uma carga sobre a fundação.

A utilização de materiais leves no corpo do aterro diminui a magnitude dos recalques primários, aprimorando as condições de estabilidade desses aterros e permitindo o início mais rápido da obra (SAKAMOTO, 2018).

As Figuras 05 e 06 na página 16 mostram o uso de EPS em uma obra rodoviária.

Figura 7 - Uso de EPS na rota das bandeiras, Jundiaí, SP



Fonte: (LOUZAS, 2013)

Figura 8 – Uso de EPS na rota das bandeiras, Jundiaí, SP



Fonte: (LOUZAS, 2013)

2.5.2. Colunas de Brita

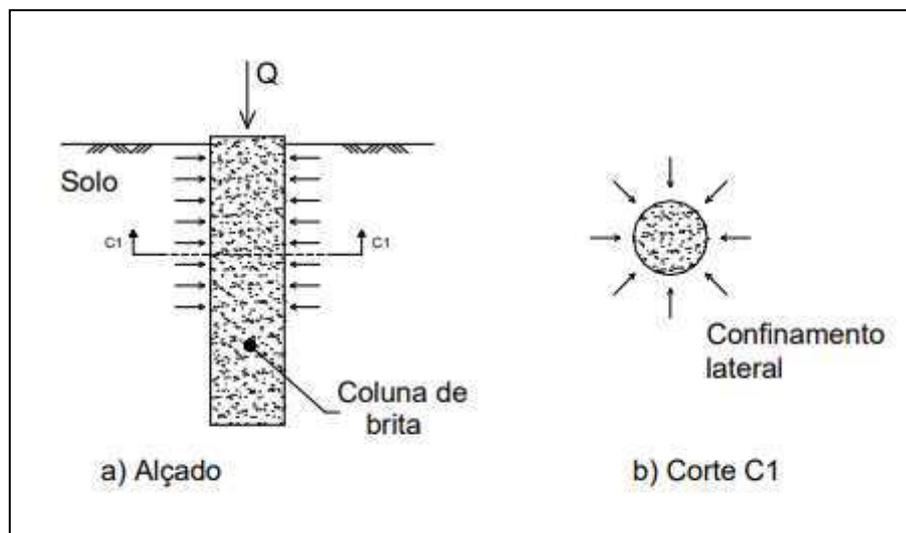
A execução de uma coluna de brita é feita através de através da inserção de um furo circular com diâmetro e comprimento determinados, a partir da superfície, e na

adição de material graúdo de grandes dimensões (brita) e sua compactação de baixo para cima.(DOMINGUES, 2006).

Inserir estas colunas em um depósito mole implica em um aumento de estabilidade nos aterros, já que as superfícies de ruptura passam a interceptar estas estruturas que proporcionam características geomecânicas superiores às do solo de fundação, além de oferecer maior drenagem das pressões neutras durante a fase de execução da obra. (MACHADO, L., 2012).

Uma coluna de brita é basicamente um sistema de reforço de solos. O solo circundante confina a brita nas laterais, possibilitando à coluna desenvolver uma capacidade portante maior que a do solo que a envolve (Figura 07). Ela interage com o solo e divide boa parte da carga aplicada. A partir da sua capacidade para se adaptar às cargas aplicadas, gera uma redistribuição de esforços nas zonas sujeitas a grandes concentrações de tensões. (DOMINGUES, 2006).

Figura 9 - Esquema simplificado de uma coluna de brita.

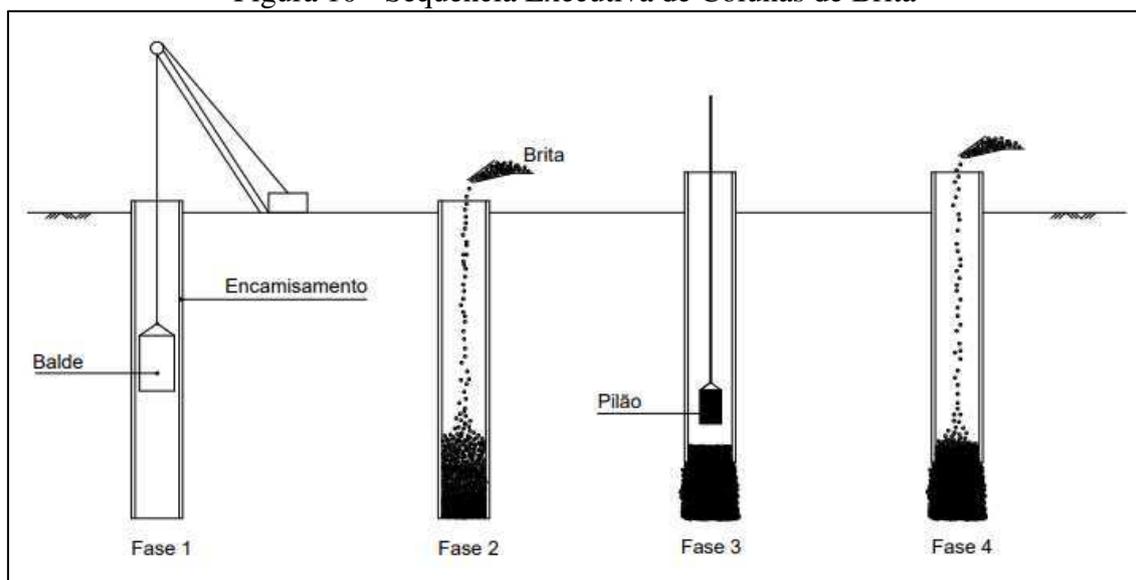


Fonte: (DOMINGUES, 2006)

O estudo da estabilidade do aterro sobre colunas granulares é realizado a partir de parâmetros de resistência ponderados do solo na região reforçada pelas colunas, medidos de acordo com os parâmetros de resistência da argila mole e da coluna e considerando o efeito de arqueamento.(MACHADO, L., 2012).

A Figura 08 mostra simplificada a sequência executiva das colunas de brita.

Figura 10 - Sequência Executiva de Colunas de Brita



Fonte: (DOMINGUES, 2006)

Diferente de outros métodos de melhoramento de solos, como a compactação dinâmica, a construção de colunas de brita não provoca grandes vibrações ou produção de ruído, tornando ideal a sua implantação em meios urbanos (DOMINGUES, 2006).

2.5.3. Colunas de Solo-Cimento

A técnica de mistura de cimento em profundidade (DSM) recorre à mistura do solo *in situ* com agentes estabilizadores, um ou dois ligantes, como por exemplo o cimento Portland, a cal viva, a cal hidratada e a escória e ainda, aditivos, tais como cal, gesso, entre outros. O objetivo principal é o melhoramento de solos que não permitem a utilização dos terrenos com fins construtivos devido às suas características geotécnicas naturais (SANCHES, 2012) e proporcionar um aumento na força e nas características da rigidez do solo, melhorando o aspecto macio dos solos e limpar um determinado local com este tipo de comportamento (MADHYANNAPU *et al.*, 2014).

A técnica de reforço e de melhoramento ou estabilização química dos solos apresenta-se como uma solução eficiente, de um ponto de vista econômico e de funcionamento, relativamente a diferentes alternativas consideradas tradicionais no âmbito da Engenharia Geotécnica, como por exemplo, a aceleração da consolidação do solo pela adição de geodrenos ou a utilização de pré-carga. Por outro lado, caracteriza-se por um reduzido impacto ambiental. Acresce ainda referir que, dadas as vantagens da técnica, esta encontra-se em permanente evolução, pelo que muitos estudos têm vindo a

ser desenvolvidos, provando que se trata de uma solução aplicada com sucesso face aos pré-requisitos estabelecidos em projeto (SANCHES, 2012).

Apesar de todos os seus benefícios, segundo Chen (*et al.*, 2013) a instalação de colunas de solo-cimento pode ocasionar poropressões excessivas e movimentos do solo em seu entorno, que prejudicam estruturas subterrâneas adjacentes, podendo tornar necessária a modificação do processo usual de DSM através do método de mistura profunda de baixo deslocamento (Método LODIC), por exemplo, que foi desenvolvido para minimizar o movimento lateral do solo. De maneira simplificada, ainda de acordo com Chen (*et al.*, 2013) neste método, é inserido um parafuso de eixo helicoidal na terra para que se possa remover o solo para a superfície, a fim de diminuir os riscos da execução da DSM.

O principal objetivo de aplicar a tecnologia DSM consiste na redução dos recalques, o aumento da capacidade de carga do solo de fundação do solo original, bem como a prevenção de deslizamento compreendendo principalmente a construção de aterros rodoviários e ferroviários (MACHADO, M., 2016)

Figura 11 - Execução de um aterro com técnica DSM.



Fonte: (CORSINI, 2014).

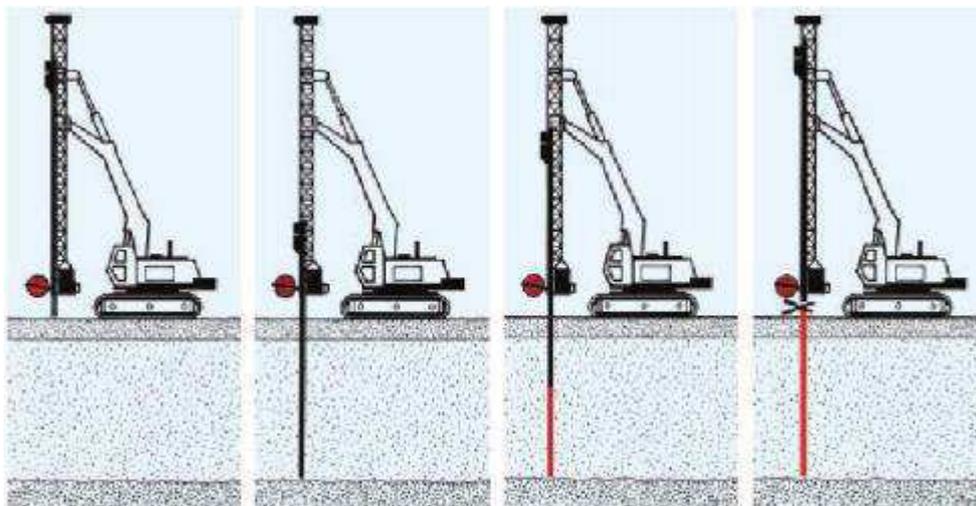
2.5.4. Geodrenos

Drenos verticais são elementos que ao serem inseridos na vertical de forma a atravessar a massa de solo compressível, tornam a distância das fronteiras drenantes menor para aproximadamente metade da distância horizontal entre drenos, fazendo o fluxo ser maioritariamente radial, de maneira a promover a aceleração da dissipação do excesso de poro-pressões e portanto dos recalques (CARDOSO, 2013).

O geodreno, é instalado com o objetivo de acelerar a velocidade de recalque de construções executadas sobre solos moles, possibilitando a redução do tempo de ocorrência destes, de anos para alguns meses. A água captada pelo dreno é transportada por meio dos canais do núcleo até a superfície do terreno, sendo drenada pela camada de dreno superior, na superfície do terreno (SGARBI et al., 2011).

Os geodrenos são inseridos por aparelhos de cravação com a sequência apresentada na (Figura 10), que possibilitam a colocação dos drenos em depósitos de baixa capacidade, sem antes necessitarem de grandes tratamentos/reforços (CARDOSO, 2013).

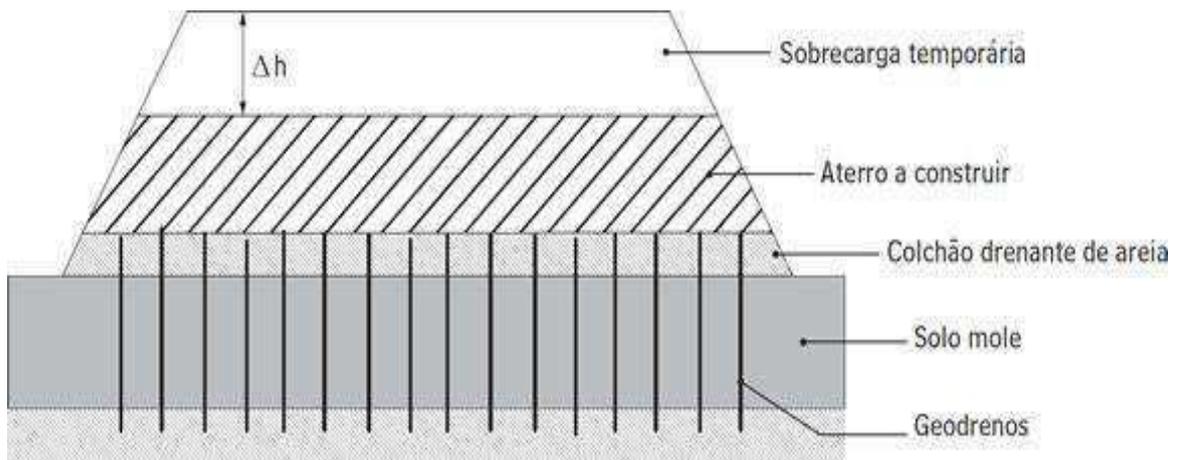
Figura 12 – Sequência de colocação de geodrenos



Fonte: (CARDOSO, 2013)

A água que é captada pelos drenos é levada para o exterior do estrato por meio das fronteiras drenantes, por causa do excesso de pressão do solo, fazendo o terreno ter a necessidade de um colchão drenante para dar vazão a água para o exterior do aterro (CARDOSO, 2013), como mostrado na figura 11.

Figura 13 - Tratamento de fundação com geodreno e sobrecarga temporária.



Fonte: (<http://infraestruturaurbana17.pini.com.br>, 2013)

2.5.5. Reforços dos solos com Geossintéticos

Geossintéticos são definidos pela Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS) como “elementos planos, produzidos a partir de polímeros sintéticos ou naturais, e utilizados em combinação com solo, rocha e/ou outros 38 materiais geotécnicos como parte integral de um projeto, estrutura ou sistema em engenharia civil” (SIEIRA, 2003).

Boa parte dos geossintéticos é formada por materiais usualmente designados por plásticos, mais exatamente como termoplásticos. As fibras naturais – lã, algodão, etc. – dificilmente são aproveitadas na fabricação destes materiais, já que são biodegradáveis e não têm propriedades adequadas à grande quantidade de aplicações. (BORGES, 1995).

De acordo com Sousa (2014), este material pode se apresentar de maneiras diferentes (Figura 12) e com vários propósitos. Atualmente são produzidos geotêxteis, geomembranas, geogrelhas, geospumas e geocompósitos, entre outros. Suas principais funções, nas suas aplicações, são de: separador, reforço, dreno, filtro e elemento de contenção. O seu emprego visa principalmente os seguintes objetivos: o de melhorar o desempenho da estrutura em que serão inseridos e o de serem mais econômicos em relação às soluções tradicionais.

Figura 14 – Exemplos de materiais geossintéticos.



Fonte: (<https://inbec.com.br>, 2018)

As principais vantagens do reforço dos solos com geossintéticos consistem em estes serem menos dispendiosos, resistentes à tração, têm rápida execução e menor impacto ao meio ambiente. Desvantagens: Existe uma incerteza da durabilidade do material e existem possíveis danos a esse material durante a estocagem, manuseio e instalação do produto (SGARBI et al., 2011).

Nas obras de taludes reforçados, a adição de elementos sintéticos (geossintéticos) no aterro possibilita uma redistribuição global das tensões e deformações induzidas, propiciando a adoção de estruturas mais íngremes e com menos volume de aterro compactado (SIEIRA, 2003).

De acordo com a aplicação, um geossintético pode desempenhar muitas funções ao mesmo tempo. Dessa forma, para dimensionar adequadamente uma obra geotécnica é necessário definir quais são as funções desempenhadas pelo geossintético e organizá-las em uma hierarquia. Assim, é possível definir as características que o geossintético deve possuir para desempenhar as funções definidas de maneira ideal. As Tabelas 1 e 2 resumem as principais aplicações dos diferentes tipos de geossintéticos utilizados na Engenharia Geotécnica (SIEIRA, 2003).

Tabela 2 - Tipos de Geossintéticos e suas principais aplicações.

Geossintético	Aplicação						
	Reforço	Filtração	Drenagem	Proteção	Separação	Impermeabilização	Controle de Erosão
Geotêxtil	*	*	*	*	*		*
Geogrelhas	*						
Geomembranas					*	*	
Geocompostos	*		*			*	
Geobarras	*						
Geoespaçadores			*				
Geotiras	*						
Georredes			*				
Geotubos			*				
Geomantas						*	*
Geocélulas	*						*

Fonte: (SIEIRA, 2003)

Tabela 3 - Resumo das aplicações dos geossintéticos e objetivos.

Aplicação	Objetivo
Reforço	Restringir deformações e aumentar a resistência do maciço em obras geotécnicas, aproveitando a resistência à tração do material geossintético.
Filtração	Permitir a passagem e coleta de fluidos, sem a movimentação de partículas do maciço.
Drenagem	Coletar e/ou facilitar os movimentos de fluidos no interior do maciço.
Proteção	Reduzir solicitações localizadas, homogeneizando o nível das tensões que atingiriam determinada superfície ou camada.
Separação	Evitar a mistura entre materiais granulares com características geotécnicas distintas.
Impermeabilização	Conter o avanço de uma pluma de contaminação, evitando a migração de líquidos ou gases em aplicações ambientais.
Controle de Erosão	Proteger a superfície do terreno contra o arraste de partículas pela ação de ventos e águas superficiais.

Fonte: (SIEIRA, 2003)

3.0. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho de revisão bibliográfica tem como base a análise, leitura e discussão do tema principal, aterros sobre solos moles, por meio da pesquisa de diversos artigos acadêmicos e capítulos de livros em sites como Google Acadêmico e Periódico Capes, durante o período de outubro de 2018 a junho de 2019, datados entre os anos de 1994 a 2018 com as seguintes palavras-chave na língua portuguesa: solos moles, aterro sobre solos moles, soluções para solos moles, recalque de solos moles; e na língua inglesa: soft soil, soft soil settlement, EPS soft soil, geofam, deep soil mixing. Os artigos utilizados para a produção deste trabalho tratam desde o conceito de solo mole até as possíveis soluções a serem adotadas para permitir a utilização deste tipo de solo na construção civil.

4.0. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a revisão de artigos, foram vistas várias propostas de melhoramento dos solos moles, dentre modelos e técnicas diferentes, mas que proporcionaram efeitos positivos e eficazes em suas aplicações.

4.1. Aterros leves com uso de poliestireno expandido

De acordo com Sakamoto (2018), em suas análises para a região do rio Luís Alves, na duplicação da BR-470, o estudo do aterro de complementação no encontro à ponte permitiu a verificação da utilização de materiais leves (EPS) no aterro como solução geotécnica para o problema apresentado, que possuía um perfil estratigráfico com uma camada de argila mole de aproximadamente 20 m.

Para a análise inicial da composição do perfil geotécnico foram realizadas oito sondagens SPT, permitindo a identificação da camada de solo mole citada anteriormente. A autora destaca que o uso do EPS para a complementação do aterro foi escolhido pelo solo já ter elementos de fundação previamente cravados e pela grande profundidade da camada de argila. A partir de modelagens numéricas realizadas em *softwares* como o *Plaxis* e avaliações de campo, foram obtidos os parâmetros necessários a um diagnóstico completo do solo, como previsão de recalques, análises de estabilidade e dos deslocamentos horizontais e verticais e, desta maneira, foi possível prever o comportamento do aterro feito com EPS.

De acordo com a hipótese comparativa entre o aterro com EPS e o aterro apenas com solo, constatou-se que tanto o recalque, quanto os deslocamentos horizontais possuem magnitudes mais significativas (em torno de 34 cm) sem a presença do EPS (com o EPS foi em torno de 8 cm).

Foi verificado pela autora que para esta situação, a solução sugerida com o uso de EPS foi bastante satisfatória, em termos de estabilidade e também de deformação. A diminuição da grandeza dos recalques previstos após a construção do aterro de complementação foi bastante significativa (como citado anteriormente, uma diminuição de 34 cm para 8 cm) quando comparada a um aterro tradicional, comprovando a eficiência do uso de aterros leves na construção de rodovias, que se tornou possível mesmo com uma camada profunda de argila mole no terreno destinado à obra.

O trabalho de Monteiro (2018) também se trata do trecho de duplicação da BR-470, assim como o trabalho discutido anteriormente, e também avalia a possibilidade de aplicação do aterro leve (EPS).

Para Monteiro (2018) a determinação dos recalques gerados pela obra estudada deu-se inicialmente, através do cálculo embasado na teoria do adensamento unidimensional. O valor encontrado para este método foi 13 cm (com a utilização de EPS), correspondente ao recalque por adensamento primário da camada argilosa, e desconsiderou-se os recalques imediato e por adensamento secundário, por serem de pequena magnitude quando comparados ao primário

Pela modelagem numérica por calculada por elementos finitos, foram encontrados recalques na faixa de 9,3 a 9,5 cm, próximos ao encontrado pelo cálculo da teoria do adensamento unidimensional (13 cm). A autora afirma que a diferença de valores pode ser justificada pelo fato de que o programa *Plaxis* realiza uma análise bidimensional, proporcionando a distribuição dos deslocamentos na malha de elementos finitos.

Monteiro (2018) ainda observa que os resultados anteriores deverão ocorrer em um período de 3 a 14 anos, quando estimados pelo programa *Plaxis*, e de 5 a 22 anos, em relação ao recalque calculado pela teoria, admitindo um grau de adensamento de 90% da camada de argila. Assim é possível observar que os deslocamentos ocorrerão durante um período de tempo considerável permitindo que ocorra a acomodação das estruturas do local, sem comprometer o solo de fundação.

A autora também realizou uma avaliação quanto a possibilidade de flutuação dos blocos de EPS, que considerou que a região nunca apresentou enchentes que atingissem o nível da BR-101. A cota adotada para esta situação foi 5,6, correspondente a 0,60 m acima do nível do terreno onde o aterro de encontro será construído (cota 5,0). Logo, concluiu-se que o peso dos materiais sobre a camada de EPS (861,8 kN/m) foi muito superior ao estimado (608,10 kN/m) para o fator de segurança mínimo (1,3) considerado para estes casos. Portanto, o aterro de encontro mostrou-se uma solução segura contra a possibilidade de flutuação dos blocos de EPS.

Finalmente, para a justificar o emprego do EPS no aterro estudado, avaliou-se a hipótese inicial desta estrutura com solo compactado. Neste caso, a previsão do recalque por adensamento primário baseada no cálculo teórico foi 67 cm, enquanto a realizada pelo programa *Plaxis* resultou no valor de 60,4 cm. Em relação aos deslocamentos horizontais, o valor máximo encontrado pelo *software* foi 11,3 cm.

Conclui-se que deslocamentos desta magnitude influenciam o solo de fundação e podem provocar a instabilidade da estrutura de terra armada do local. Ou seja, podem ocorrer deslocamentos verticais da ordem de 40 cm e horizontais em torno de 11,3 cm. Estes valores são aproximadamente 13 e 12 vezes maiores aos respectivos resultados encontrados para o aterro com EPS.

Então, por todas as razões apresentadas nos dois trabalhos realizados para a rodovia, demonstrou-se que a solução geotécnica para o aterro de encontro com a utilização de EPS atinge todos os requisitos necessários e mostrou-se satisfatória quanto as condições de entorno.

4.2. Geossintéticos e Geodrenos

Sobre os encontros da ponte dos três riachos na BR-101, uma das obras da implantação do Contorno Viário de Florianópolis, em Santa Catarina, temos o estudo de Santos (2015), que propõe o dimensionamento de seções de aterro com geogrelhas (tipo de geossintético discutido anteriormente) bidirecionais e geodrenos, com o objetivo de estabilizar os aterros e diminuir a extensão das bermas de equilíbrio, além de diminuir os prazos de adensamento.

As investigações geotécnicas realizadas pelo autor consistiram em oito sondagens mistas, uma sondagem SPT, um ensaio de adensamento e uma sondagem vertical de ensaio em que foram realizados ensaios dos tipos CPTu, Vane Test e caracterização. As sondagens mistas mostraram uma camada de solo mole silto-arenoso com variações de 4m a 8m de profundidade, com existência de uma camada arenosa abaixo destes solos compressíveis.

Para o dimensionamento adequado das seções de aterro, nas análises de estabilidade foram verificadas inicialmente as alturas admissíveis de aterro de modo que não houvesse ruptura do solo de fundação. Como $h_{adm} = 4,45m < h_{crit} = 5,78m$ o autor propõe então, como solução para a camada de solo mole mostrada anteriormente, a aplicação de geogrelhas de 600kN/m e geodrenos distribuídos em malha quadrada com espaçamento de 1,50x1,50m com profundidade média de 9m em ambas as margens da ponte, e uma vazão mínima de 200m³/ano possibilitando a redução dos tempos de adensamento de aproximadamente 9 e 6,6 anos, que seriam os prazos naturais, para cerca de 9 meses.

O autor dividiu as análises de estabilidade em análises de curto prazo e análises de longo prazo em que foram consideradas, respectivamente, a construção dos aterros em solo compactado até a cota final de terraplenagem, com fator de segurança mínimo em 1,30 e os recalques resultantes do período de adensamento, a construção do pavimento, e a carga de tráfego da rodovia de 20 kN/m. O fator de segurança mínimo requerido é de 1,40, conforme DNER-PRO 381/98.

Com a aplicação das geogrelhas tornou-se possível a redução de bermas de equilíbrio que seriam aplicáveis em até 50m de extensão dos aterros do encontro de cada margem do encontro de ponte, para 16m de comprimento por 3m de altura na margem Norte e 10m de comprimento e 3m de altura na margem Sul.

Os recalques primários previstos (0,87m e 1,01m) foram compensados com alturas de aterro, enquanto que os recalques secundários retornaram valores inferiores a 0,10m, sendo considerado aceitáveis que ocorram durante o tempo de vida útil da obra.

Desta forma, observa-se que as análises e investigações realizadas contemplaram soluções usuais e consagradas na prática de engenharia, executando-se aterros em etapa única com utilização de reforços geossintéticos associados a bermas de equilíbrio.

No trabalho de Cardoso (2013) foi realizada uma comparação em relação às soluções para dois aterros experimentais em solos moles, na argila da região de Pirajubaé em Santa Catarina, que se mostrou com altíssima compressibilidade.

Um dos aterros (AE1) foi construído com reforço sintético na base e com a fundação tratada com drenos verticais, sendo muito comum nas soluções das obras atuais, e com a intenção de investigar a influência dos drenos num regime de construção rápida, afim de melhorar a estabilidade e reduzir os recalques pós-construtivos, respetivamente.

O local escolhido para este aterro experimental apresentava, em valor médio, uma camada de aterro hidráulico de 1,70m e 8,20m de espessura de argila mole.

Cardoso (2013) relata que foram colocados drenos verticais pré-fabricados, com recurso à cravação de um mandril de 15cm de diâmetro, com um espaçamento horizontal entre drenos de 1,3m em padrão triangular e com comprimento de forma a atravessar toda a camada de argila.

A altura máxima prevista para que o aterro experimental atingisse a ruptura, através das análises de estabilidade pelos métodos de equilíbrio limite, era de 3,00m. Sendo que o aterro só parou de crescer, em altura, quando este atingiu a ruptura, que ocorreu aos 5,00m.

O projeto do aterro experimental foi considerado bem-sucedido com a superfície de ruptura ocorrida na posição esperada e além disso, foi possível observar uma drenagem imediata no colchão drenante logo no início da aplicação de cargas sobre este.

Finalmente, através da modelagem realizada, a autora verificou que a camada de argila obteve melhorias consideráveis, resultando em assentamentos menores e conseqüentemente houve a diminuição do coeficiente de permeabilidade, o que acabou provocando a necessidade de mais tempo para a dissipação das poro-pressões

4.3. Colunas de solo-cimento (DSM):

No trabalho de Sanches (2012) que avaliou um terreno de solo argiloso mole para construções rodoviárias na região de aluviões do Tejo em Portugal, ela observa que as técnicas que aplicam o melhoramento dos solos através da cimentação, como técnica de DSM *Deep Soil Mixing* (DSM), estudada em sua tese, ao criar colunas mais resistentes e rígidas surge como uma técnica alternativa para solucionar este problema, destacando-se das soluções consideradas tradicionais, principalmente pelo tempo despendido no processo de execução.

O relatório geológico e geotécnico realizado, demonstra que a região tem sua constituição essencialmente argilosa e caracteriza-se por ter uma permeabilidade reduzida e um teor em água bastante elevado (até 60m de espessura) e são constituídas maioritariamente por lodos com intercalações de areias mais ou menos lodosas e, na base, é também frequente a existência de camadas constituídas por cascalheiras de calhaus rolados.

Para realizar a análise da implementação da solução de DSM, a autora fixou um diâmetro de 0,8m e estudou os afastamentos entre colunas de, nomeadamente, 1,6m, 2,4m, 3m, 3,3m e 4m. De uma maneira geral, Sanches (2012) conclui que quanto menor for o afastamento, menores serão os assentamentos ao nível do aterro.

Foi observado também que para tornar rígida a mistura do solo misturado com cimento é necessário considerar o efeito do tempo de cura, e também que quanto mais elevado for este tempo, menores serão naturalmente os deslocamentos associados ao aterro.

A admissão de um cálculo para uma consolidação de cinco anos, em comparação com uma consolidação de 90%, não apresentou alterações significativas ao nível dos

assentamentos. Tal situação demonstra que a consolidação da camada de argila presente no maciço de fundação, não condiciona os assentamentos na base do aterro, já que são as colunas que controlam este comportamento de deslocamento do mesmo.

Finalmente, segundo a autora, na maioria das vezes a aplicação de um aterro de pré-carga está associada a um tempo de atuação muito longo, que implicam em atrasos da entrada em serviço da obra final para o qual o solo foi tratado. Ela ainda destaca que mesmo com o custo duas vezes mais elevado que a técnica de geodrenos e pré-carga, a solução de colunas DSM é sete vezes mais rápida. Portanto em uma obra em que o fator tempo for mais importante, a técnica de DSM apresenta eficiência definitivamente superior à técnica que recorre à aplicação de geodrenos e pré-carga.

O trabalho de Machado, M. (2016) apresenta dois estudos de caso, sendo um deles o tratamento de solos moles para implantação da técnica DSM na viabilização da implantação de um trecho do corredor expresso para ônibus articulado, interligando o bairro de Deodoro ao Centro da cidade do Rio de Janeiro, em que foram feitas duas misturas com diferentes teores de cimento.

O trecho do corredor de ônibus que recebeu o tratamento com colunas de DSM localiza-se sobre um aterro que foi construído na década de 40, sobre um espesso depósito de argila mole da orla da Baía de Guanabara que viabilizou a implantação da Avenida Brasil.

Abaixo do pavimento de concreto da Av. Brasil, o subsolo se trata de uma camada com espessura de 2m de aterro de base e sub-base de material granular contaminado de argila mole derivado da camada subjacente a esta. Em seguida há uma camada de argila orgânica muito mole a mole com espessura média igual a 10 m. Ainda após a camada de argila muito mole há presença de uma camada de argila arenosa média a dura com espessura aproximada de 3 m e seguida a esta camada encontra-se um solo residual silto-arenoso.

Foi previsto para a construção em questão, como pavimento, a execução de uma laje de concreto armado apoiada diretamente sobre as colunas de DSM. Para suportar o carregamento da infraestrutura da via e a carga de tráfego, o projeto de tratamento de solo foi dimensionado com colunas de 1m de diâmetro dispostas em malha quadrada com espaçamento entre os eixos das colunas igual a 2 m e profundidade média igual a 15 m.

Considerou-se uma concentração do carregamento atuante igual 100% sobre as colunas, deste modo as colunas foram dimensionadas para atingir a resistência média igual ou maior que 1 MPa com fator de segurança global de 2,5.

Para composição da mistura em questão, foi empregado o cimento CII-E-40 como ligante (considerando aspectos logísticos e econômicos). Foram avaliadas apenas duas misturas que diferem somente no teor de cimento empregado (mistura 1 com 350 kg/m³ e mistura 2 com 350 kg/m³).

A autora observa que o aumento da resistência ocorreu de forma proporcional entre as duas misturas ao longo dos 28 dias de cura e que uma diferença de 100 kg/m³ de cimento entre a mistura 1 e 2 resultou na mistura 2 um aumento da resistência de aproximadamente 40% em relação a mistura 1.

Também foi realizado um ensaio laboratorial em que as amostras da mistura ainda fresca foram coletas através do método "wet grab" no meio da camada de solo compressível e os corpos de prova foram moldados com ajuda de uma mesa vibratória para reduzir os possíveis vazios.

Machado, M. (2016) observa que para 28 dias de cura das colunas de DSM, a média das resistências à compressão simples atingiu o valor de 2,56 MPa. Já para as misturas produzidas em laboratório, o valor da resistência de campo (0,5 MPa e 6,5 MPa) também é bastante superior à resistência de projeto de 1,00 MPa.

Estatisticamente, o valor do coeficiente de variação é 0,53, que apesar de muito acima da faixa esperada para técnica de DSM, considerou-se aceito, pois os resultados analisados mostraram que a dispersão dos resultados é formada por valores maiores que a resistência de projeto.

A partir destes dois trabalhos sobre a técnica DSM é possível perceber que a aplicação inicial da tecnologia no Brasil tem sido positiva, já que nos dois casos foram atendidos de maneira satisfatória os critérios de aceitação indicados no projeto.

5.0. CONCLUSÃO

Os estudos realizados mostram que com o crescimento das cidades, as áreas com solos moles, consideradas ruins para a construção de estruturas implicaram no surgimento de soluções diferentes para o aproveitamento destas áreas desde as soluções clássicas como a substituição de solos, até as mais modernas e inovadoras como o emprego de geossintéticos.

É possível concluir que os aterros sobre solos moles podem ser executados com eficiência, desde que o comportamento destes solos seja bem analisado com relação à sua estabilidade, possibilidade de recalques e resistência ao cisalhamento, por exemplo.

As avaliações das soluções mais adequadas, dependem desde uma boa interpretação das particularidades de cada solo até a análise de critérios que a obra deverá obedecer, como orçamento e tempo por exemplo. Como foi discutido anteriormente, há casos em que a aplicação de colunas de solo-cimento (DSM) é preponderantemente vantajosa em relação à execução de geodrenos, sendo sete vezes mais rápida apesar de ser duas vezes mais cara.

Deve-se também considerar se há a existência de mão de obra adequada na região em que as obras serão executadas, bem como se há condições ambientais e vizinhança adequadas à aplicação das determinadas soluções para os aterros em solos moles.

Tendo em vista as tecnologias utilizadas com mais recorrência nos últimos dez anos, é possível verificar que a utilização de materiais geossintéticos, colunas de solo-cimento (DSM) e aterros leves (EPS) vêm ganhando cada vez mais notoriedade por diversos motivos, e em diferentes lugares do mundo, como Brasil e Portugal por exemplo, desde a facilidade de manutenção até a rapidez de execução, que em boa parte das obras é o fator principal a se considerar.

Não é possível especificar qual solução é melhor que outra, tendo sempre em vista que deverão ser utilizadas soluções adequadas às propriedades de cada solo e às condições de cada obra, tornando-se possível viabilizar diferentes tipos de construções em praticamente qualquer lugar.

6.0. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAY, Onur *et al.* Geotextiles and Geomembranes Behavior of sandy slopes remediated by EPS-block geofabric under seepage flow. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 37, p. 81–98, 2013.

ALMEIDA, Márcio de Souza S.; MARQUES, Maria Esther Soares. *Aterro sobre solos moles - projeto e desempenho*. 2º ed. [S.l.]: Oficina de Textos, 2014.

BELLO, Maria Isabela Marques da Cunha Vieira. *Estudo de ruptura em aterros sobre solos moles - aterro do galpão localizado na BR-101 - PE*. 2004. Universidade Federal de Pernambuco, 2004.

BORGES, José. *Aterros sobre solos moles reforçados com geossintéticos*. 1995. 1-68 f. 1995.

BRANDI, JOSÉ LUIZ GONÇALVES. *Previsibilidade e controle de recalques em aterros sobre solo mole*. 2004. 182 f. Universidade Federal do Paraná, 2004.

CARDOSO, Maria Carmo Gomes. *Análise de soluções de projeto de aterros sobre solos moles*. 2013. Instituto Superior Técnico Lisboa, 2013.

CHEN, Jin-jian *et al.* Field tests , modification , and application of deep soil mixing method in soft clay. v. 139, n. January, p. 24–34, 2013.

DOMINGUES, Tiago Sarmiento Sabino. *Reforço de fundações com colunas de brita em aterros sobre solos moles* . 2006.

DOMINONI, Claudia Martins Bhering. *Análise de estabilidade e compressibilidade de um aterro sobre solo mole no Porto de Suape , região metropolitana do Recife*. 2011. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

FUTAI, Marcos. *Considerações sobre a influência do adensamento secundário e do uso de reforços em aterros sobre solos moles*, 2010;

JR., M. O. Cecílio; FUTAI, M. M.; ABRAMENTO, M. *Resistência ao cisalhamento e deformabilidade de solos residuais da região metropolitana de São Paulo*. [S.l.]: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2009. .

MACCARINI, Marciano. *Construção de aterro sobre solos moles com utilização de EPS*.

Geosul, p. 9, 2013.

MACHADO, Layza Verbena de Souza Santos. Avaliação do deslocamento vertical de aterro sobre solo mole executado no projeto de duplicação da Br-101/PE. 2012. 199 f. UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, 2012.

MACHADO, Michelle Christini de Brito. Tratamento de solos argilosos moles por mistura de cimento em profundidade. 2016. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

MADHYANNAPU, Raja S *et al.* Design and construction guidelines for deep soil mixing to stabilize expansive soils. v. 140, n. 9, p. 1–15, 2014.

MARANGON, M. Geotecnia de fundações. [S.l: s.n.], 2009. p. 46–89.

MASSOCCO, Narayana Saniele. ENGENHARIA CIVIL IMED Análise de estabilidade de um aterro sobre solo mole e medidas de melhorias nas condições do solo v. 4, p. 81–96, 2017

MONTEIRO, Marianna. Utilização de EPS em aterro sobre solo mole: encontro do viaduto da pista de duplicação da BR-470, na interseção com a BR-101. 2018. Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

MORAES, Christiane. Aterros reforçados sobre solos moles – análise numérica e analítica, 2002

OLIVEIRA, Henrique. Comportamento de aterros reforçados sobre solos moles levados à ruptura. 2006. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

PENHA, Maria José Ayres Zagatto. Algumas considerações a respeito da resistência ao cisalhamento na interface solo argiloso - geotêxtil não-tecido. Universidade Estadual de Campinas, 1999.

PITOL, Mayara. Construção de um inclinômetro aplicado ao monitoramento de obras geotécnicas. 2017. Universidade de Passo Fundo, 2017.

PROJETO DE ATERROS SOBRE SOLOS MOLES PARA OBRAS VIÁRIAS. In: DNER. *Dner-Pro 381/98*. [S.l: s.n.], 1998. p. 34.

SAKAMOTO, Myrian. Solução geotécnica com utilização de eps em aterros sobre solo

mole : Estudo de caso na complementação do aterro de encontro à ponte sobre o Rio Luís Alves – duplicação BR-470, Engenharia Civil. Universidade Federal de Sant. 2018.

SANCHES, Sara. Reforço de solos moles de fundação de aterro em deep soil mixing. Modelação de caso de estudo. 2012.

SANTOS, FELIPE SOUZA DOS. Aterros sobre solos moles: dimensionamento dos encontros da ponte sobre o rio três riachos, BR-101 (SC), 2015

SANTOS, Thaís Oliveira *et al.* Descrição de técnicas de melhoramento para construção de aterro sobre solos moles. 2018.

SGARBI, Bruno; CHIARANI, Rafaela; GARCIA, Ronaldo. Pavimentação em terrenos de solos moles : a utilização de colunas granulares encamisadas. p. 1–6, 2011.

SIEIRA, Ana Cristina Castro Fontenla. Estudo experimental dos mecanismos de interação solo-geogrelha. 2003. PUC - Rio, 2003.

SOUSA, João Diogo De. O projeto, construção e desempenho de barragens de aterro com geossintéticos. 2014. Técnico Lisboa, 2014.

THOMÉ, Antônio. Estudo do comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais. 1994. 168 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 1994.

VALERIM JR, V. Análise e dimensionamento de um aterro sobre solos moles – lote 29 BR-101-Sul: estudo de caso. 2010. 113p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) Universidade doExtremo Sul Catarinense - UNESC. Criciúma, 2010.