

METODOLOGIAS CONSTRUTIVAS EM SOLOS MOLES

Esdras Emerson Pascoal Ferreira¹

Marcos Antônio da Silva²

Resumo

O estudo dos solos é algo muito notável devido a sua importância nas obras de engenharia. O solo exerce um papel muito significativo para a construção civil devido a sua grande aplicação como material de construção, aterros, base de pavimentos para aeroportos, barragens, fundações e contenções. Quando o solo tem características desfavoráveis à construção com baixa resistência à penetração e elevada compressibilidade, este é considerado solo mole. As metodologias construtivas sobre esse tipo de solo servem como soluções que visam garantir a estabilidade, resistência para o solo mole, aumento do fator de segurança quanto à ruptura e a minimização de recalques. Possibilitando uma construção segura, com solo resistente e estável.

Palavras-Chave: Solos. Aterros. Solo mole. Construção.

CONSTRUCTIVE METHODOLOGIES ON SOIL SOILS

Abstract

The study of soils is significant because of its importance in engineering works. The soil exerts a vital role for a civil construction due to its tremendous application as construction material, landfills, pavement bases for airports, dams, foundations, restraints when the soil has characteristics unfavorable to the construction with low consistency high compressibility, which is the case of soft soils, such as the constructive methodologies on this type of soil, such as those aiming to guarantee stability, resistance to mole soil, increase of the safety factor of rupture, and the possibility of any setbacks. Possibility of safe construction, with resistant and stable soil.

Keywords: Soils. Embankments. Soft ground. Construction.

¹Graduado em Engenharia Civil pelo UGB/FERP.

²Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Introdução

Os solos moles são caracterizados por baixa capacidade suporte, baixa resistência, permeabilidade e alta deformabilidade comprometendo assim qualquer carga imposta aos mesmos. Existem diversos métodos construtivos para aterros sobre esse tipo de solo, que deve ser escolhido de forma adequada levando em consideração as características geotécnicas dos depósitos de solos moles. Caso a espessura da camada seja pequena e as distâncias dos transportes não forem muito grandes, pode ser realizada a remoção do solo. Já no caso de solos muito moles, com espessas camadas, é comum o uso de reforços com geossintéticos junto com a maioria das soluções construtivas de aterro. (Almeida e Marques, 2010).

Em muitos casos que existe alguma restrição de prazo que inviabilizam a utilização das técnicas convencionais, sobre drenos verticais ou restrições de espaço que podem inviabilizar o uso de bermas, no caso de vias urbanas, técnicas com elementos de estacas ou aterros leves são favorecidas, porém elas têm um alto custo. Por isso deve-se fazer uma análise das características geotécnicas que são muito variáveis para desenvolver um bom projeto. (Almeida e Marques, 2010).

O objetivo central deste trabalho é apresentar os conceitos fundamentais para a compreensão do assunto e as principais metodologias construtivas utilizadas para a execução de aterros sobre solos moles. O presente trabalho está organizado da seguinte forma: Na seção 1 é apresentada a base conceitual para a compreensão sobre solos, solos moles, sua origem e formação. A seção 2 apresenta as investigações geotécnicas que são necessárias para a caracterização dos solos. Na seção 3, apresenta-se o conceito de deformações, as suas principais causas e os tipos de recalques. A seção 4 apresenta as principais metodologias construtivas para aterros. Por último, a seção 5 conduz as conclusões do trabalho.

Formação dos solos

Definição de solo

J.A.R ORTIGÃO (2007) definiu solo como um aglomerado de partículas provenientes de deterioração da rocha através de um processo chamado de intemperismo. Este é dividido em dois grandes grupos: intemperismo mecânico e químico. O intemperismo químico tem a ação com vários processos químicos que alteram, solubilizam e depositam os minerais das rochas, formando os solos, muito comuns em lugares quentes e úmidos. Já o intemperismo mecânico é devido a ação desagregadora de agentes como: água, vento e variação da temperatura. Os solos que permanecem próximos à rocha são chamados de residuais. Os demais são conhecidos como sedimentares ou transportados. A figura 1 apresenta um exemplo de solo residual:

Figura 1. Perfil geotécnico típico de um solo residual



Fonte: J.A.R ORTIGÃO (2007)

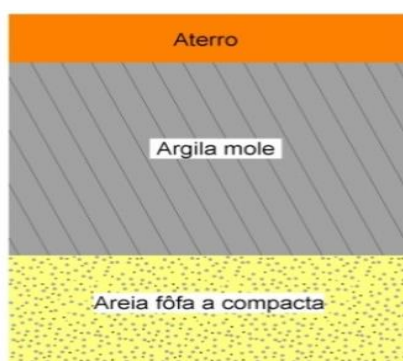
Definição de solos moles

De acordo com Massad (2010), solos moles são solos sedimentares com baixa resistência à penetração. Geralmente com valores de SPT inferiores a 4 golpes, onde a amostra de argila tem as características de um solo coesivo e compressível. A NBR 6502 ABNT 2001b, define como solo muito mole aquele no

qual a resistência não drenada da argila é inferior a 25 kPa ou número de golpes NSPT < 2. A principal característica desse tipo de solo é ter uma elevada compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento. Isso é devido a sua granulometria que é formada por porções bem finas de silte e argila.

Geralmente um solo sedimentar sempre está impregnado de húmus, matéria orgânica absorvida pelas partículas de solo que lhe dão uma cor característica escura e de cheiro único (Massad, 2010). A figura 2 apresenta um perfil geotécnico típico dos solos moles:

Figura 2. Perfil geotécnico típico dos solos moles



Fonte: J.A.R ORTIGÃO (2007)

Investigação geotécnica

Parâmetros geotécnicos

Antes da elaboração de um projeto de aterro sobre solos moles é necessário conhecer bem as propriedades e características geotécnicas do solo. Para isso são realizados alguns ensaios em laboratório e campo para a determinação dos parâmetros necessários para o projeto. Na Tabela 1 é apresentado o resumo dos principais parâmetros necessários para a elaboração de projetos de aterros sobre solos moles e suas características.

Tabela 1 - Resumo dos principais parâmetros geotécnicos

Ensaio	Tipo	Objetivo do ensaio	Principais parâmetros obtidos
Laboratório	Caracterização completa	Caracterização geral do solo; interpretação dos demais ensaios	W_n , w_L , W_p , G_s , curva granulométrica
	Adensamento	Cálculo de recalques e de recalques x tempo	C_c , C_s , σ'_{vm} , C_v , e
	Triaxial UU	Cálculos de estabilidade (S_u é afetado pelo amolgamento)	S_u
	Triaxial CU	Cálculos de estabilidade; parâmetro para cálculos de deformabilidade 2D (MEF)	S_u , c' ,

Campo	Palheta	Cálculos de estabilidade	S_u , S_t
	Piezocone (C _{ptu})	Estratigrafia; recalques x tempo (a partir do ensaio de dissipação)	Estimativa do perfil de S_u , C_h (C_v)
	T _{bar}	Resistência não drenada	Estimativa do perfil de S_u
	Dilatômetro (DMT)	Ensaio complementar	S_u , OCR, K_o
	Pressiômetro	Ensaio complementar	S_u , G_o

Fonte: Adaptado de Almeida e Marques (2010)

A seleção do ensaio deverá ser feita de acordo com o parâmetro buscado pelo projetista para execução do projeto, a disponibilidade por região e experiência

do projetista também influenciará na escolha do ensaio adequado para execução do projeto.

Investigação preliminar

É importante iniciar com uma investigação preliminar para ter parâmetros iniciais do solo investigado.

O ensaio de SPT (Standart Penetration Test) traduzindo ao pé da letra seria Ensaio de Penetração Normal, é o mais utilizado tanto no Brasil como no mundo. É um método de Normatizado (NBR 6484) conhecido como Sondagem a Percussão. (Rebello, 2008)

Segundo a NBR 6484 (2001), o objetivo deste ensaio é a determinação dos tipos de solo em suas respectivas profundidade, nível d'água e os índices de resistência à penetração (Nspt) a cada metro. Com este método é possível determinar os índices de resistência, possibilitando classificar os siltes argilosos e argilas segundo a Norma através da tabela 2 a seguir:

Tabela 2. Classificação dos Solos de acordo com o número de golpes (SPT)

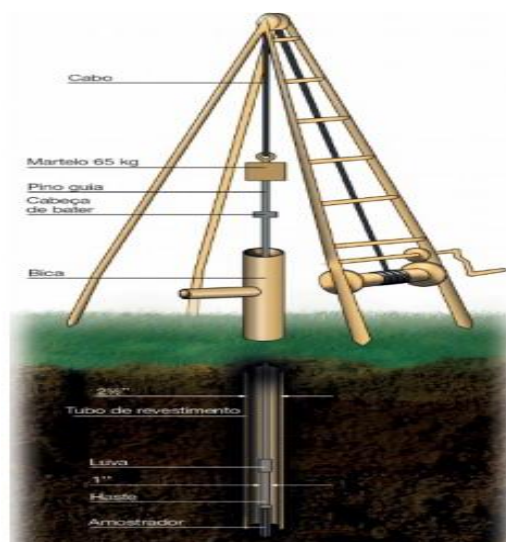
Solo	Índice de resistência à penetração	Designação
Areias e siltes arenosos	<4	Fofa
	5 a 8	Pouco compacta
	9 a 18	Medianamente compacta
	19 a 40	Compacta
	>= 40	Muito compacta
Argilas e siltes argilosos	<2	Muito mole
	3 a 5	Mole

	6 a 10	Média
	11 a 19	Rija
	≥ 19	Dura

Fonte: NBR 7250

Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), o ensaio é feito a partir de uma perfuração por trado e circulação de água, utilizando um trépano de lavagem como ferramenta de escavação. No ensaio é retirado partes representativas do solo a cada metro de profundidade para a classificação do solo que é feita por meio de um amostrador padrão com um diâmetro externo de 50mm. Todo o procedimento de ensaio consiste na cravação deste amostrador no fundo de uma escavação utilizando-se a queda de um peso com 65kg de uma altura de 750mm. O valor de NSPT é o numero de golpes necessários para fazer o amostrador penetrar 300mm, após uma cravação inicial de 150mm. A figura 3 apresenta um equipamento de sondagem a percussão:

Figura 3. Equipamento de sondagem a percussão



Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012)

As vantagens desse ensaio é a simplicidade para execução e disponibilidade, para estudo inicial ele é válido, mas não é recomendado fazer somente ele porque este ensaio não determina com precisão o valor da pressão de pré-adensamento que é importante para a previsão de deformações em solos moles. (Schnaid e Odebrecht, 2012). Por isso é recomendado os ensaios de piezocone, ensaios de palheta e adensamento edométrico para complementação que oferecem dados confiáveis para um dimensionamento mais preciso.

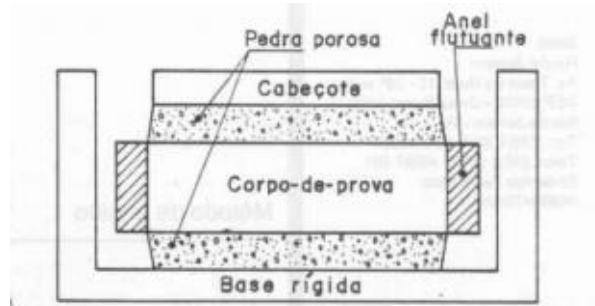
Ensaio edométrico

O ensaio de compressão edométrica ou ensaio de adensamento unidimensional é normatizado pela (NBR-12007) e tem por objetivo a determinação das propriedades de adensamento do solo, caracterizada pelo tempo em que ocorrem as deformações. O processo ocorre com uma amostra de solo contida num molde submetido à compressão. O objetivo é observar o comportamento do solo quando está sujeito a um esforço de compressão, para obter uma previsão de recalques. Ideal para construção de aterros.

O procedimento é executado da seguinte forma:

Uma pequena amostra é moldada dentro de um anel metálico com diâmetro entre 5 cm a 12 cm e confinado no topo e na base por pedras porosas para que haja uma drenagem da água contida no solo. Na parte superior a pedra, coloca-se uma placa rígida de aço (cabeçote) para que seja aplicada a carga. O anel lateral impede a deformação lateral da amostra. Para cada aplicação de carga é registrado a deformação em diversos intervalos de tempo (15s, 30s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min.. 24hrs). NBR (12007). Sequencias de cargas usualmente utilizadas neste ensaio: 10; 20; 40; 80; 160; 320; 640 (kPa). A figura 4 apresenta esquematicamente a célula de adensamento:

Figura 4. Representação esquemática da célula de adensamento



Fonte: NBR – 12007

O processo é feito até que as deformações se estabilizem, Após isso é realizado um gráfico esboçando os resultados (recalque x tensão vertical). Com os resultados é possível definir os índices de vazios de cada estágio a partir do índice de vazios inicial do corpo de prova e a variação de altura no final do ensaio usando a fórmula abaixo:

$$e_o = V_v / V_s$$

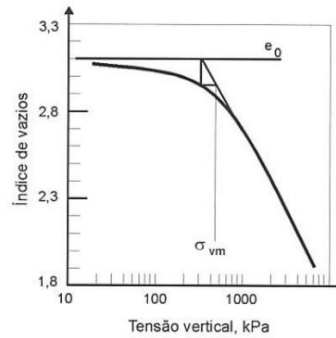
Onde:

V_v = volume de vazios

V_s = volume dos sólidos

Para obter os valores de σ'_{vm} poderemos utilizar o método Pacheco Silva. No qual é prolongada a reta virgem até a horizontal do índice de vazios inicial da amostra analisada. No ponto de intersecção, é traçada uma vertical até a curva do ensaio e desse ponto é traçada uma nova horizontal. O ponto de pré-adensamento é considerado na intersecção da última horizontal traçada com o prolongamento da reta virgem, como visto na figura 5. (Pinto, 2006).

Figura 5 - Método Pacheco Silva



Fonte: Pinto (2006)

Deformações

Definição de recalque

Segundo Rebello (2008) recalques são as deformações que ocorrem no solo quando submetido a cargas provocando movimentação, que dependendo da intensidade, podem resultar em graves danos à estrutura. A análise de recalques visa garantir a cota final de projetos dos aterros após os recalques construtivos, somando os recalques imediatos e os primários.

Causas do recalque

As principais causas dos recalques são:

A) Cargas estáticas

- Peso próprio
- Pressão transmitida ao solo pela fundação
- Aterros e barragens

- Forças capilares

B) Cargas dinâmicas

- Vibrações (tráfego, cravações de estacas).
- Tremores de terra

C) Erosão do subsolo

- Ruptura de tubulação
- Formação de cavernas por animais
- Química (Dolina, dissolução de calcário formando cavernas).

D) Rebaixamento do lençol

freático ou alívio de pressões

- Por carregamento do material
- Mudança do γ_{sub} para γ_{sat} ou σ'_{vm}

Tipos de recalques

São três os tipos de recalques que ocorrem em aterros sobre moles e eles podem ser divididos em:

- Recalques imediatos
- Recalque por adensamento primário
- Recalques secundários

Recalques imediatos

O recalque imediato ocorre instantaneamente devido à aplicação de cargas na superfície, não há alteração no volume da argila e nem expulsão de água, por isso são chamados de não drenados. Geralmente este tipo de recalque é de pequena significância quando comparado ao recalque por adensamento, no caso de aterros com grandes dimensões (comprimento e largura), por isso são desconsiderados. (Almeida e Marques, 2010). Esse tipo de recalque se processa somente após a aplicação das cargas.

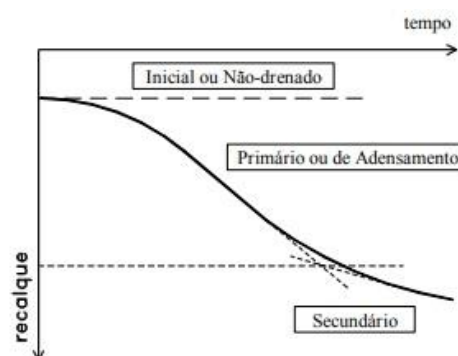
Recalques primários

O recalque primário ocorre ao longo do tempo, durante o processo de transferência de esforços entre a água e a estrutura sólida, está ligada a expulsão de água dos vazios. O recalque equivale à variação de altura da camada do solo. (Gerscovish, 2016).

Recalques secundários

O recalque secundário está diretamente ligado às deformações que ocorrem no fim do processo de adensamento primário, quando as tensões efetivas já estão estáveis. Neste processo, as partículas buscam um posicionamento para formar um arranjo mais estável, tendo em vista que no final do adensamento primário ainda se encontram posicionadas num equilíbrio instável. (Gerscovish, 2016). A figura 6 será apresenta a evolução dos recalques através do tempo:

Figura 6 - Evolução dos recalques através do tempo



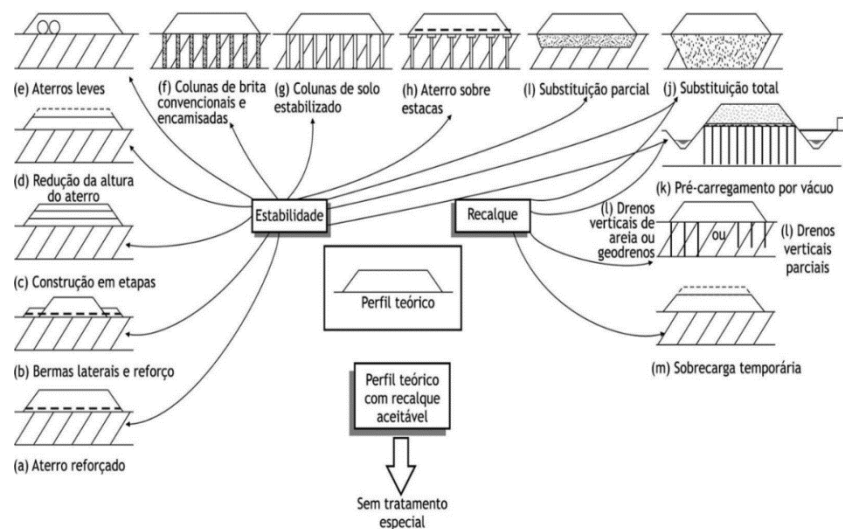
Fonte: Gerscovish, Denise.

Metodologias construtivas

Segundo Almeida e Marques (2010), as metodologias construtivas devem ser escolhidas seguindo alguns parâmetros:

- Características geotécnicas dos depósitos;
- Utilização da área, incluindo a vizinhança;
- Prazos construtivos;
- Custos envolvidos;

Figura 8. Métodos construtivos em aterros sobre solos moles



Fonte: Almeida e Marques (2010)

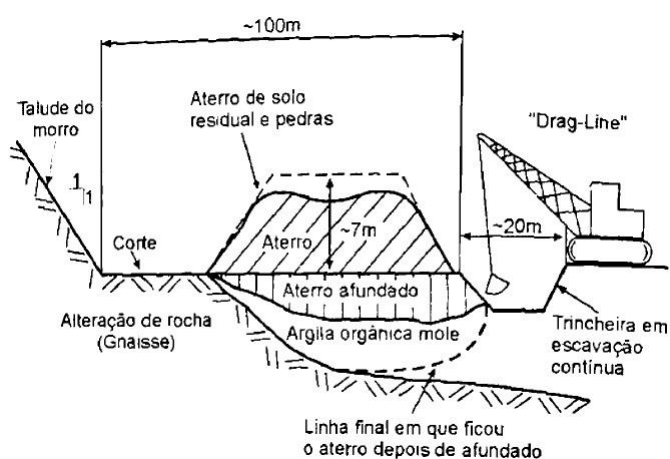
Substituição de solos moles

A substituição de solos moles é realizada através de dragas, escavadeiras ou explosivos, para liquefazer os solos moles para fazer a retirada parcial ou total desses solos e a colocação de aterro em substituição ao solo mole.

Essa metodologia é aplicada em solos de camadas compressíveis com espessura de até 4m. A principal vantagem deste método é que diminui ou elimina qualquer possibilidade de recalque e aumenta o fator de segurança do solo quanto à ruptura. (Almeida e Marques, 2010). A expulsão do solo mole com explosivos é feita com a colocação prévia do aterro para que ele tome o lugar do solo mole assim que começar a liquefazer. (Massad, 2005).

A figura 9 mostra como é realizado o procedimento de substituição de solos moles:

Figura 9 - Remoção da camada de argila mole



Fonte: Massad (2005)

Aterros com sobrecarga temporária

Este tipo de aterro, também conhecido como pré-compressão, é realizado através de uma carga superior a que o solo terá durante sua construção ao longo do tempo. Esse procedimento acelera os recalques e aumenta a resistência da camada de solo mole. (Massad, 2005)

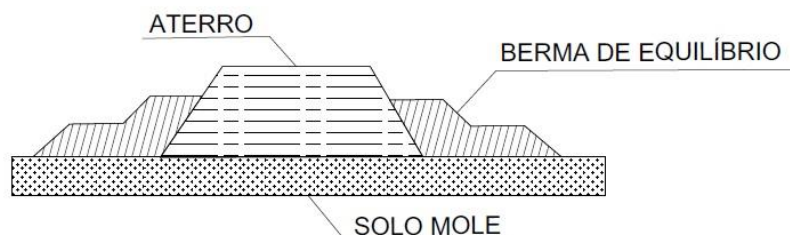
O aterro com sobrecarga temporária aumenta a velocidade dos recalques primários, mas tem como desvantagem o tempo de estabilização dos recalques que

são muito altos por causa da baixa permeabilidade das camadas moles de argila e também o alto custo com terraplanagem de bota fora e empréstimo de material. Quando os recalques são alcançados, o material é retirado e pode servir de aterro em outro local. (Almeida e Marques, 2010).

Aterros com bermas de equilíbrio

Aterros com bermas de equilíbrio são aterros laterais que agem como sobrecarga, indo contra ao aterro principal, evitando sua ruptura global. Geralmente são usadas como fator de segurança. (Massad, 2005). A figura 10 apresenta um exemplo de aterros com bermas de equilíbrio:

Figura 10. Aterros com bermas de equilíbrio



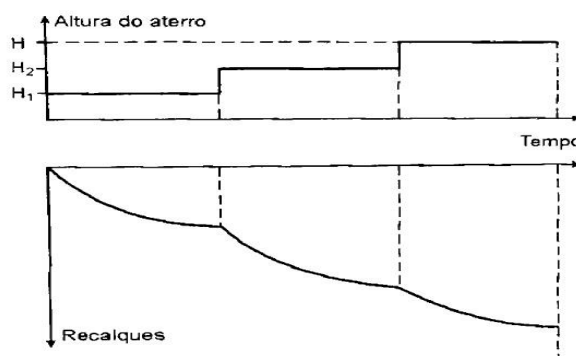
Fonte: Adaptado de Almeida e Marques (2010)

Aterros executados por etapas

O método simplesmente é a construção do aterro por partes quando a altura final do aterro é superior à altura crítica. O processo de execução consiste em deixar o solo mole se adensar com o peso de um aterro com a altura (H_1), com isso há um enrijecimento do solo, permitindo num novo acréscimo que é a altura (H_2), e continua até chegar à altura desejada, altura final (H). (Massad, 2005).

Esta técnica exige um prazo superior de construção pelo tempo que o solo leva para recalcar, como mostrado na figura 11:

Figura 11. Aterros por etapas



Fonte: Almeida e Marques (2010)

Aterros leves

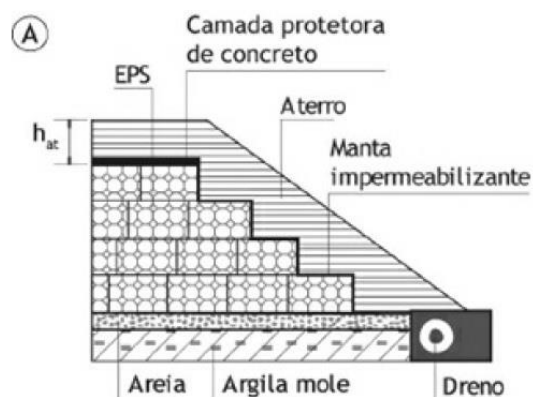
Os recalques sobre o solo mole tendem a ser maiores com os aterros convencionais devido ao peso, causando um acréscimo de tensão vertical. Uma solução para isso são os aterros leves que melhoram na estabilidade, rápida implantação e diminuição de recalques. (Almeida e Marques, 2010). Um dos materiais que tem sido mais utilizados neste tipo de aterro é o EPS (Poliestireno expandido) por ter menor peso específico (15 a 30 kgf/m³), vide tabela 3, uma alta resistência (70 a 250 kPa) e uma baixa compressibilidade (1 a 11 MPa), vide figura 12. (Almeida e Marques, 2010).

Tabela 3. Pesos específicos dos materiais leves

Material	Peso específico (kN/m ³)
Poliestireno expandido - EPS (isopor ou similar)	0,15 a 0,30
Tubos de concreto (diâmetro de 1 a 1,5m; espessura da parede de 6 a 10 cm)	2 a 4
Pneus picados	4 a 6
Argila expandida	5 a 10
Serragem	8 a 10

Fonte: Almeida e Marques (2010)

Figura 12. Aterros Leves



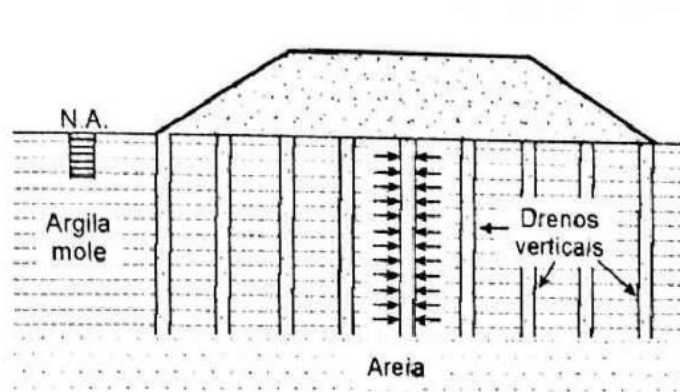
Fonte: Almeida e Marques (2010)

Aterros com drenos verticais

Quando o solo é muito espesso, a sobrecarga temporária se torna ineficiente, neste caso pode-se usar os drenos verticais que aceleram o processo de adensamento. (Massad, 2005)

O mais comum é o dreno vertical de areia (vide figura 13). Sua instalação é feita através de um tubo metálico com ponta aberta até a cota desejada, geralmente acima do solo mole. Depois é feita a limpeza do tubo para colocação da areia. O diâmetro varia entre 20 cm a 45 cm e espaçamento de 1 m a 4,5 m. Deve ter cuidados especiais para que não torne o dreno totalmente ineficiente com a retirada do tubo (Massad, 2005).

Figura 13. Aterros com drenos verticais



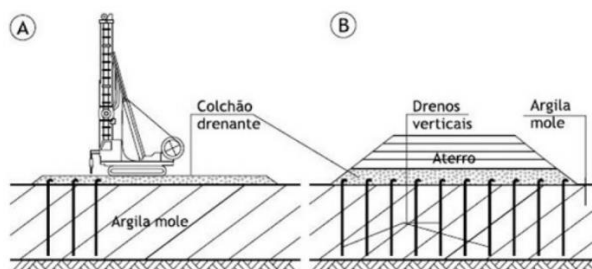
Fonte: Massad (2005)

Os geodrenos verticais pré-fabricados foram usados inicialmente na década de 70 nos EUA, consistem em um núcleo de PVC com um filtro de geotêxtil ao redor.

Os geodrenos apresentam uma elevada resistência mecânica o que lhe garante total integridade na hora da cravação no solo suportando os esforços verticais e horizontais. (Almeida e Marques, 2010).

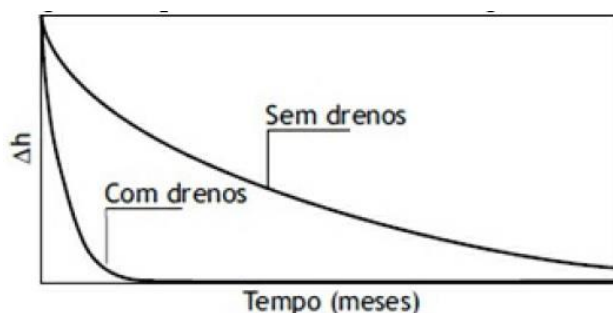
Neste método a água é coletada pelos drenos verticais até a superfície do terreno onde se encontra o colchão drenante. O processo pode ser feito por gravidade ou bombeamento, isso dependerá do comprimento do colchão, sua declividade e espessura. (Almeida e Marques, 2010). Como mostrado nas figuras 14 e 15:

Figura 14. Execução dos drenos verticais



Fonte: Almeida e Marques (2010)

Figura 15. Evolução dos recalques com e sem a utilização de drenos



Fonte: Almeida e Marques (2010)

Considerações Finais

Cada metodologia apresentada tem características específicas que podem ser usadas em diversas situações. Mas com a necessidade de se executar aterros cada vez mais rápidos e economizar tempo, vemos que os aterros leves têm características melhores e mais eficientes que os aterros convencionais, porém com um alto custo. Somente a partir dos estudos de cada metodologia construtiva sobre solos moles pode-se escolher a mais adequada diante do que se objetiva. Levando em consideração os principais parâmetros para escolha: custos, utilização de área, prazos e características geotécnicas dos depósitos e tecnologia disponível para executar determinada metodologia. Deve-se fazer uma pesquisa bem minuciosa do solo em questão a partir de ensaios, verificar a disponibilidade de ensaios por

região, utilização de mão-de-obra confiável e qualificada, entre outros aspectos para a execução de um bom projeto.

Referências

Almeida, Márcio de Souza S. **Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

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

_____. **NBR 6502: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001b.

_____. **NBR 7250: Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos** – Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 12007: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional** - Rio de Janeiro, 1990.

Gerscovish, Denise; **Apostila de compressibilidade e adensamento**. Faculdade de Engenharia, Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2016

J.A.R ORTIGÃO. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3ª Edição. Rio de Janeiro: TERRATEK, 2007.

Massad, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

Pinto, Carlos de Sousa – **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas/3ª Edição**. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

Rebello, Yopanan Conrado Pereira, 1949 – **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. – São Paulo: Zigurate Editora, 2008.

Schnaid, Fernando **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. -- 2. ed. São Paulo : Oficina de Textos, 2012.