

# **SOLUÇÕES GEOTÉCNICAS ADOTADAS PARA A CONSTRUÇÃO DE ATERROS SOBRE SOLOS MOLES: REVISÃO DA LITERATURA**

## **GEOTECHNICAL SOLUTIONS FOR CONSTRUCTION OF EMBANKMENTS ON SOFT SOILS: LITERATURE REVIEW**

França, Fagner A. N. de; *Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, Brasil, fagneranfranca@gmail.com*  
Silva, Caroliny A. G.; *Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, Brasil, caroliny\_azevedo@hotmail.com*  
Cardoso, Raymison R.; *Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, Brasil, raymisonrc@hotmail.com*

### **RESUMO**

A construção de aterros sobre solos moles tem sido uma prática cada vez mais comum, visto que o aumento populacional em todo o mundo impõe a necessidade de melhorias em obras de infraestrutura, adequando e garantindo espaços para acompanhar esse crescimento. Existem inúmeros estudos relacionados a esse tipo de obra, buscando descobrir novas tecnologias e aprimorar as técnicas existentes. Esses estudos permitem ao engenheiro fazer uma melhor análise de qual solução é mais adequada para determinada situação. Este artigo tem o objetivo de elaborar uma revisão das soluções geotécnicas empregadas para mitigar os problemas de recalque e ruptura que acometem a construção de aterros sobre solos moles. Para isso, foram reunidos estudos de caso de obras reais nos quais foram aplicadas algumas destas soluções. Relataram-se, para cada caso, as condições de aplicação, desempenho e benefícios ou problemas executivos. A coleta de dados foi realizada no Portal de Periódicos CAPES/MEC, do governo brasileiro, para o período de 2012 a 2017. Foi possível identificar que alguns métodos podem ser aplicados em conjunto e que a utilização de drenos verticais pré-fabricados (PVDs) é a técnica mais adotada, seguida de reforço com geossintéticos. Além disso, concluiu-se que a Ásia foi o continente com maior número de estudos de construções sobre solos moles, segundo os critérios de busca empregados, e a aplicação em rodovias é a principal finalidade desse tipo de obra.

### **ABSTRACT**

Building on soft soils has been an increasingly common practice, considering that the population growth around the world imposes improvements in country infrastructure. There are numerous studies related to the construction of embankments over soft soils, seeking to investigate new technologies and to improve the existing techniques. This approach helps the engineer to make a better analysis of which solution is the most appropriate for a given situation. This paper presents a review of geotechnical solutions used to mitigate the problems of settlement and failure that affect the design of embankments on soft soils, in order to gather real case studies in which some of these solutions have been fixed. Reporting, for each case, the conditions of application, performance and executive benefits. Data was collected at the CAPES/MEC Portal, a brazilian government platform in which academics can find several distinct journals. Papers published between 2012 and 2017 were investigated. The results showed that some methods can be applied altogether and the prefabricated vertical drains (PVDs) are the most widely adopted technique, followed by geosynthetics reinforcement. It was also concluded that Asia is the continent with the largest number of studies regarding constructions on soft soils and highways are the main purpose of this type of work.

### **1 - INTRODUÇÃO**

Pinto (2006) afirma que o objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista de engenharia, é poder estimar seu provável comportamento ou, pelo menos, orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema. Os solos moles apresentam baixa capacidade de carga, baixa permeabilidade e alta compressibilidade. Quando solicitados por aterros, demonstram problemas de recalque e instabilidade.

No Brasil, em toda faixa litorânea é comum serem encontrados depósitos que apresentam solos moles em sua formação, além de regiões próximas a rios. Os estudos mostram aterros com diversas funções, como as rodovias, entre o Sul e Nordeste do país; e edificações, devido a ocupação, em Santos e no Rio de Janeiro (Futai, 2010).

Aterros sobre solos moles podem ser construídos aplicando-se diversos métodos construtivos, que estabelecem dificuldades extras às análises de recalques, mas que viabilizam, em muitos casos, as construções sobre este tipo de solo (Teixeira, 2012). O objetivo dos reforços é diminuir as forças que causam a ruptura e aumentar as forças resistentes.

Nesse contexto, a construção de aterros sobre solos moles exige um estudo detalhado dos parâmetros geotécnicos, bem como do mercado atual da engenharia, no que diz respeito a valores, disponibilidade e prazos, além das limitações impostas ao uso do meio ambiente.

Este artigo tem como objetivo apresentar uma revisão da literatura sobre as soluções geotécnicas adotadas para a construção de aterros sobre solos moles e reunir estudos de caso com suas aplicações reais em campo. Os estudos de caso apresentados foram abordados em artigos científicos, teses e dissertações encontrados na plataforma científica do Portal de Periódicos CAPES/MEC, do governo brasileiro. São relatadas suas aplicações, desempenhos diante da finalidade da obra e benefícios ou problemas executivos.

## 2 - REVISÃO DA LITERATURA

Massad (2010) afirma que solos moles são os solos sedimentares com baixa resistência a penetração (valores de SPT não superiores a 4 golpes), em que a fração argila imprime as características de solo coesivo e compressível. São em geral, argilas moles ou areias argilosas fofas, de deposição recente, isto é, formadas durante o quaternário.

Comuns em todo o litoral brasileiro e em regiões lacustres, os depósitos de solos moles ganharam destaque no Brasil e no mundo, devido ao aumento da densidade populacional dos centros urbanos. Com isso, tornou-se imprescindível a expansão e o melhoramento da infraestrutura de transportes dos países, sendo necessário a construção de aterros sobre solos instáveis que, hoje em dia, são comuns na Engenharia Geotécnica. Práticas de construção deficientes nesse tipo de trabalho podem levar a falhas ou deformação excessiva do aterro, o que pode comprometer a sua função (Araújo et al., 2012).

A problemática desse tipo de obra envolve não apenas recalques excessivos, como também a ocorrência de ruptura. Os recalques são possibilitados pela alta compressibilidade, que pode causar grandes deformações, enquanto que a ruptura da estrutura ocorre devido à baixa resistência não drenada desse tipo de solo, que pré-determina um nível de carregamento máximo a ser colocado.

O reforço do solo torna-se indispensável em situações onde há a possibilidade de recalques perceptíveis ou ruptura, e sua função é promover o melhoramento das características do solo, como resistência ao cisalhamento, compressibilidade, capacidade de carga e densidade.

Diversas técnicas executivas são aplicadas e estudadas no mundo todo. A Figura 1, adaptada de Leroueil (1997), mostra um resumo das soluções mais comuns e clássicas que ajudam no beneficiamento do solo, indicadas para problemas de estabilidade e recalque.

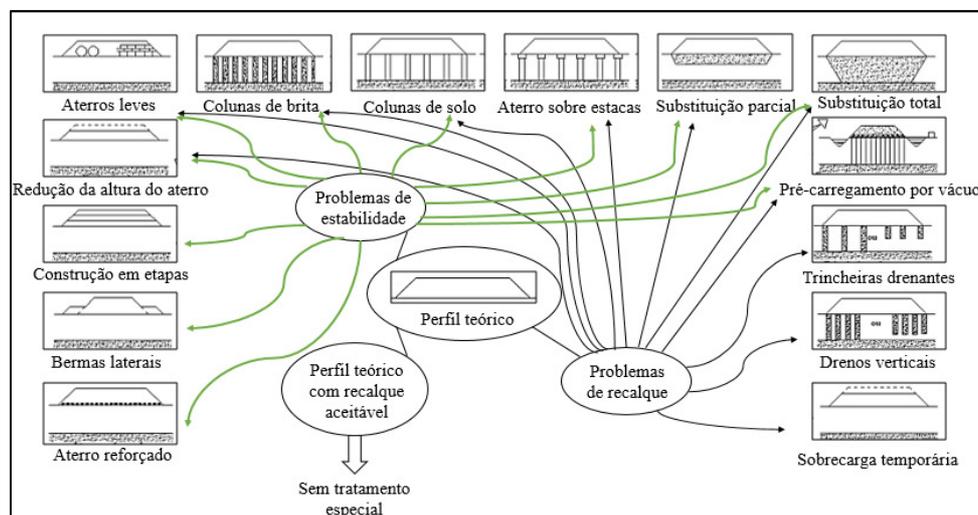


Figura 1 – Técnicas executivas de aterros sobre solos moles. Fonte: Leroueil, 1997. Adaptado pelo autor

Algumas dessas técnicas ainda são ineficazes para finalidades específicas, e de custo elevado, o que desperta o interesse em estudar o funcionamento de novos materiais e tratamentos. A seguir, serão apresentadas as soluções geotécnicas abordadas nos estudos de caso coletados ao longo da pesquisa.

### 2.1. Sobrecarga

Também conhecida por pré carregamento, o DNER (1998) explica o processo como “aplicar uma sobrecarga temporária, em geral da ordem de 25 a 30% do peso do aterro para acelerar os recalques”. A verificação em campo dos recalques e poropressões, juntamente com estudos de adensamento, determinam o tempo de permanência dessa sobrecarga.

A sobrecarga, ao ser aplicada, gera um excesso de poropressão que é transmitida aos grãos do solo, ao mesmo tempo que a água é expulsa e os grãos tornam-se mais próximos, aumentando a resistência do

solo e provocando recalques aos longo do tempo, até estabilizar. É um método clássico e tradicional, além de ser econômico. Porém, em regiões com camadas profundas de solo mole, pode não ter efeito significativo e provocar falhas que levam a ruptura do aterro. Além de que, devido à baixa permeabilidade e ausência de um sistema de drenagem eficiente, o tempo de estabilização pode ser muito maior que o esperado.

Desse modo, ainda é bastante combinado aos drenos verticais pré-fabricados, para juntos desempenharem a função de manter o aterro dentro dos limites de recalque e ruptura. O que dificulta a utilização dessa técnica, é o fato de ela necessitar de bermas de equilíbrio, maiores alturas, não garantir grande estabilidade e apresentar maior movimentação lateral.

## 2.2. Pré-carregamento a vácuo

O pré-carregamento a vácuo é adotado para situações em que não permite grandes sobrecargas e o cronograma é curto. Isso se deve ao fato desta técnica reduzir a poropressão enquanto mantém a tensão total constante. Seu efeito é equivalente ao da aplicação de uma sobrecarga adicional ao solo, o que é, frequentemente, feito nas fases iniciais para satisfazer os requisitos de segurança (Zhuang e Cui, 2016).

Essa solução é, geralmente, aplicada de maneira associada aos drenos verticais. A técnica consiste na aplicação de uma pressão constante e sucessiva de vácuo, que chega à camada de solo por meio dos drenos, os quais também conduzem a água que é expulsa ao passo que a poropressão é reduzida, sendo a tensão efetiva aumentada na mesma proporção e a tensão total invariável. Tudo isso ocorre através de um dispositivo de ar-água que interliga o sistema. A combinação, pré carga a vácuo + PVD, é considerada um dos métodos de melhoramento mais baratos existentes atualmente e tem sido amplamente utilizado.

Em relação ao processo de sobrecarga, o pré carregamento a vácuo dispensa a construção de bermas de equilíbrio e utilização de material de aterro adicional, diminui a sobrecarga, demonstra melhor controle de estabilidade, menor movimento lateral e um tempo de construção mais acelerado. Pode ser utilizado com ou sem membrana.

## 2.3. Drenos verticais pré-fabricados (PVDs)

O processo executivo dos drenos verticais pré-fabricados consiste em um furo feito no solo por um mandril, envolvido por uma membrana geotêxtil, que atua permitindo a passagem de água entre os poros e retendo o material argiloso. O objetivo de sua aplicação é reduzir o comprimento de drenagem, reduzindo também o tempo de consolidação.

A perfuração gera um estresse no solo, principalmente próximo ao mandril. Essa perturbação significativa pode diminuir a permeabilidade do solo na região afetada, chamada de *smear zone* (Pajouh, 2014). A Figura 2 mostra a indicação da *smear zone* no dreno vertical pré-fabricado.

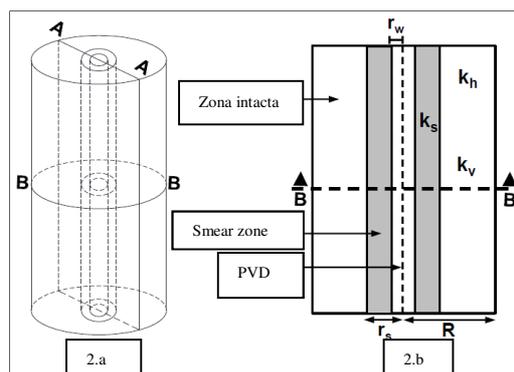


Figura 2 – PVD com indicação de zona perturbada: 2.a) dreno instalado, 2.b) perfil A-A. Fonte: Pajouh (2014)

Podem estar associados a outras técnicas que resultem em parâmetros do solo mais aceitáveis. Concomitantemente ao pré carregamento à vácuo, os drenos transmitem a pressão a vácuo para as camadas de solo mais profundas, reduzindo o tempo de consolidação do solo e de finalização da construção. Por não influenciar na estabilidade da inclinação, os PVDs se associam à colunas de brita e estacas, por exemplo, para garantir que não ocorra o rompimento da estrutura. Além disso, o uso combinado com camadas de geossintéticos pode reduzir significativamente os deslocamentos, tensões e os momentos de flexão sobre as estacas de fundação.

## **2.4. Geossintéticos**

A Associação Brasileira de Geossintéticos define-os como “produtos industrializados com pelo menos um de seus componentes fabricado com polímero sintético ou natural. Apresentam-se na forma de manta, tira, ou estrutura tridimensional, e são utilizados em contato com o solo ou com outros materiais em aplicações da engenharia civil, geotécnica e ambiental.”

Os geossintéticos tem sido amplamente utilizados para reforço do solo por apresentarem praticidade, economia, facilidade de execução e eficiência, além de estarem dispostos em diversas opções que se adaptam a qualquer situação. Camadas desse reforço são introduzidas horizontalmente sob uma camada de solo bem compactada, para promover a distribuição das tensões horizontais, aumentando a capacidade de carga do maciço e prevenindo a ruptura.

Palmeira (1999) diz que os benefícios da presença desse reforço são: distribuição de tensões mais favorável para o solo mole; aceleração do processo de adensamento, caso o reforço seja drenante; execução de taludes mais íngremes; e aumento do fator de segurança.

Podem atuar simultaneamente junto aos PVDs, colunas de brita, estacas, aterros leves e outras técnicas usuais. Diante de uma classificação de diversos tipos de geossintéticos, os principais utilizados em solos e que atuam como reforço são os geotêxteis, geogrelhas e geocélulas.

## **2.5. Colunas de brita**

Segundo Etezzad et al. (2014) as colunas de brita são feitas de agregado compactado, encamisadas com um tecido geossintético para evitar a colmatagem e são instaladas em solos moles como reforços para aumentar a resistência ao cisalhamento da massa do solo e, conseqüentemente, a sua capacidade de carga.

Assim como os drenos verticais pré-fabricados, as colunas de brita proporcionam um encurtamento do caminho de drenagem, aumentando a taxa de consolidação e acelerando os recalques. Além disso, é vista como uma técnica econômica e prática.

Na constante busca por melhorias, estudos mostram adaptações a esse método, como é o caso de colunas de brita argamassadas, que consiste em adicionar argamassa à coluna, por injeção, cujo objetivo é reduzir o assentamento pós-construção. Também é interessante o uso de placas centralizadas no topo das colunas, isso possibilita uma maior transferência de carga para as pilhas (Liu, 2015).

## **2.6. Colunas de areia**

São usualmente praticadas relacionadas a sobrecargas, para acelerar o processo de recalque. Do mesmo modo que os PVDs e as colunas de brita, as colunas de areia também são encamisadas com geossintético e auxiliam na rápida dissipação do excesso de poropressão, com a diminuição do percurso de drenagem. São geralmente empregadas como uma alternativa barata e em substituição as colunas de brita.

Também apresentam o efeito da chamada “smear zone” que, como relatada anteriormente, resulta em uma diminuição do coeficiente de permeabilidade na região perturbada.

Falhas frequentes são relatadas e Al Saudi et al. (2016), diz que uma das desvantagens da areia é o seu menor ângulo de atrito interno e menor rigidez em relação à brita. Isso implica em resultados desfavoráveis e causam desinteresse para sua utilização, tendo em vista as diversas opções de técnicas eficientes que estão em constante aperfeiçoamento.

## **2.7. Substituição de solo**

Este é um método eficaz e rápido, porém a remoção da camada de solo mole para substituição por materiais alternativos depende de sua espessura, pois a relação custo/benefício precisa ser analisada. Camadas profundas necessitam de mais mão de obra especializada e mais material para preenchimento, além de ocasionar um grande impacto ambiental, devido a exigência de encontrar um local adequado para deposição do material retirado.

De acordo com Almeida e Marques (2010), é uma técnica utilizada para camadas de solo mole de até 4,0m de espessura. O processo executivo consiste na formação de um aterro de conquista com o material que preencherá a escavação, para permitir a circulação dos equipamentos sem danos ao solos. Em seguida, é feita a remoção do solo acompanhada do uso de drenos e bombas que desviam a água da escavação. Por fim, preenche-se com o material escolhido, que é compactado em etapas.

## 2.8. Bermas de equilíbrio

Conforme o DNER (1998) é um procedimento utilizado para estabilizar e suavizar a inclinação de um talude, aumentando seu fator de segurança. O processo é realizado por tentativas, alterando a geometria até se obter o fator de segurança desejado.

Garantem a estabilidade do aterro, evitando a ruptura em casos que sua altura seja superior a altura crítica do aterro. Os principais fatores de restrição para o emprego desta técnica são a quantidade de material de aterro necessário e a obrigação de áreas laterais para sua implantação.

O processo de execução do aterro apoiado por bermas compreende, inicialmente, a construção da primeira camada com altura menor que a altura crítica do aterro, e as bermas laterais de mesma altura para contrapeso. Logo depois, o aterro é finalizado com a altura prevista. A sobrecarga gera uma superfície de ruptura, inibida pelo peso das bermas, promovendo a estabilidade do solo.

## 2.9. Estacas

O aterro estruturado sobre estacas transmite o carregamento para o solo mais resistente, localizado abaixo da camada de solo mole, através de capitéis ou laje sobrepostos às estacas. É comum a utilização simultânea com geossintéticos.

O processo construtivo baseia-se na execução de estacas sobre as quais são assentados capitéis em concreto. Posteriormente, é disposta uma camada de geossintético em toda a extensão da base sob o aterro final, que permite maior espaçamento entre as estacas, redução das dimensões dos capitéis e neutraliza o empuxo horizontal do maciço. Quando o geossintético não é utilizado, as estacas das extremidades do grupo precisam estar inclinadas.

Entre os inúmeros tipos de estacas encontrados, serão citadas as que foram abordadas nos artigos em estudo. Zhang et al. (2015) apontou que as estacas chamadas de colunas de mistura profunda ou deep mixed (DM) podem ser fabricadas por mistura mecânica de solo in situ com cimento ou outros agentes. Já as estacas de concreto de grande diâmetro (PCC), em comparação com as de alta resistência (PHC) e a de cascalho com cimento (CFG), tornou-se mais econômica, por utilizar menos barras de reforço e menos concreto (ZHOU et al., 2016).

Para Cheng et al. (2014), a combinação entre geossintético e estaca, chamada GRCS (*geosynthetic-reinforced and column-supported*) pode, de fato, aliviar as tensões em aterros e ser uma medida eficiente e econômica.

Os fatores que influenciam no desempenho dessa solução são, basicamente, iguais aos PVDs e colunas de brita e areia. São eles: o tipo de arranjo, triangular ou quadrado, o diâmetro da estaca e ao espaçamento entre elas.

## 2.10. Jet grouting

*Jet grouting* são colunas de solo-cimento que consistem na introdução de um jato da pasta de cimento no terreno, a altas pressões, grandes velocidade e impacto, desagregando o solo e misturando-se a este. Isso produz uma coluna de jato de forma cilíndrica, que melhora as propriedades mecânicas e de permeabilidade do solo.

Primeiramente é feito um furo com perfuratriz, até a cota final. Em seguida, inicia-se, de baixo para cima, a injeção da calda de cimento que se mistura ao solo por movimentos rotativos, até a base. Essa técnica por ser utilizada em qualquer tipo de solo, sendo muito eficiente nos solos moles.

Segundo a norma europeia EN 12.716 (2001), a técnica pode ser classificada em três tipos, de acordo com o número de fluidos injetados no subsolo:

- Fluido único: uma mistura de água/cimento é injetada para quebrar e, simultaneamente, misturar o solo in-situ. Os diâmetros variam de 0,40 a 1,00 metro.
- Fluido duplo: uma combinação de ar e mistura de água/cimento é injetada para quebrar e, simultaneamente, misturar o solo in-situ. Variação de diâmetro entre 0,80 e 2,50 metros.
- Fluido triplo: uma combinação de jato de água/ar é usada para quebrar e remover parcialmente o solo in-situ, enquanto a mistura do solo é assegurada por uma menor injeção de água/cimento.

O contínuo estudo por novas tecnologias fez surgir o método horizontal de duplo *jet grouting*, que utiliza ar comprimido e dois tipos de ligantes (cimento e silicato de sódio), injetados separadamente através dos diferentes canais de hastes de fluido triplo (WANG et al, 2013).

### 2.11. Aterros leves

Esse tipo de solução faz uso de materiais chamados de leves no corpo do aterro, que permitem aliviar as cargas verticais, evitando grandes assentamentos e perda de estabilidade, e acelerando o tempo de construção. A Figura 4 mostra um esquema de comparação da funcionalidade entre o material tradicional e o leve.

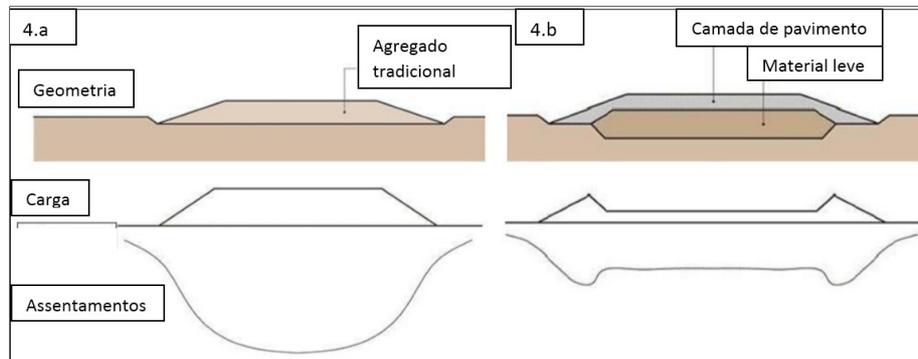


Figura 4 – 4.a) Diagrama de carga e assentamentos para aterro com material tradicional; 4.b) Diagrama de carga e assentamentos para aterro com material leve. Fonte: Reis e Ramos, 2009

O método executivo começa com o nivelamento do terreno para depois ser posicionado o material leve. Logo após, é ideal a utilização de um geossintético para proteção do material contra ataques químicos e uniformizar a distribuição das cargas no material leve. Por fim, é executado o aterro que terá uma redução considerável da pressão de superfície.

Esses materiais tem como característica principal o baixo peso específico, devido a elevada porosidade. Os mais conhecidos e utilizados são o poliestireno expandido (EPS), argila expandida, e espuma de vidro (Patriarca, 2012), mas também há estudos com pneus picados, serragem e tubos de concreto vazados. Neste artigo, o estudo de caso com material leve, trata-se do GCM, um tapete celular em que sua estrutura permite o livre fluxo de água enquanto iguala qualquer assentamento diferencial e que atendeu as exigências de projeto (Wijeyesekera et al., 2016).

Para evitar rupturas é necessário proteger o material leve com mantas impermeabilizantes na parte superior, para evitar contato com material solvente; fixa-lo, para evitar deslocamentos; e promover o uso conjunto com geodrenos na base do aterro, para a remoção de água em caso de elevação do nível da água.

## 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

A busca persistente por estudos de caso, com aplicações em campo, que apresentassem situações de construção sobre solos moles se deu por meio eletrônico, no sítio do Portal de Periódicos CAPES/MEC. A plataforma, totalmente financiada pelo governo brasileiro, “é uma biblioteca virtual que reúne e disponibiliza a instituições de ensino e pesquisa no Brasil o melhor da produção científica internacional.” (CAPES).

A procura foi realizada entre os meses de março e abril de 2017, visando acumular trabalhos publicados entre os anos de 2012 e 2017. Portanto, ainda que as obras tenham sido realizadas antes desse período, as medidas mitigadoras foram adotadas há pouco tempo e os resultados são recentes.

Fez-se uma pré-seleção de mais de 70 artigos com o tema em questão, disponibilizados na plataforma de estudos escolhida, seguida de uma leitura objetiva de cada um. Assim, puderam ser identificados aqueles que abordavam estudos de campo com situações reais e, posteriormente, analisados seus desempenhos.

## 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diante das inúmeras produções coletadas para a época e biblioteca virtual determinadas, foram descartadas aquelas que tratavam apenas de estudos empíricos, em laboratório. Dessa maneira, a prioridade foi para as produções que compreendiam construções sobre solos moles com aplicações reais das soluções em campo. Dos 22 trabalhos identificados com essa característica, resultaram 24 estudos de caso, que estão dispostos a seguir, com suas finalidades, localização e conclusão.

O propósito das construções variaram entre infraestrutura de transportes, aterro de ensaio e central nuclear. As conclusões foram influenciadas pelas condições nas quais a solução foi submetida, no que diz respeito a finalidade da obra, parâmetros do solo e execução, bem como as limitações de cada uma.

A Figura 5 apresenta o número de casos de obra em relação ao tipo de estrutura em construção. Percebe-se claramente a preponderância de casos de execução de aterros sobre solos moles na construção de rodovias. Isso pode ser devido a sua grande extensão, comumente atravessando terrenos diversificados. A Figura 6, por sua vez, indica o número de casos de obra considerados neste estudo em função do continente em que foram executados. Verificou-se um maior número de estudos referentes à obras executadas no continente asiático.

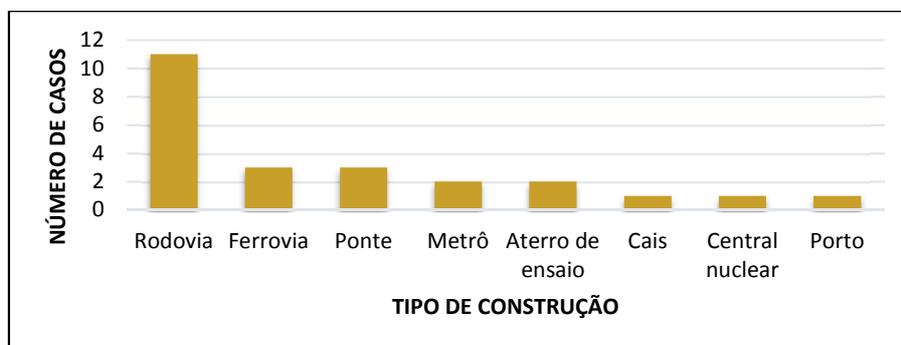


Figura 5 – Número de casos por tipo de construção. Fonte: Autor

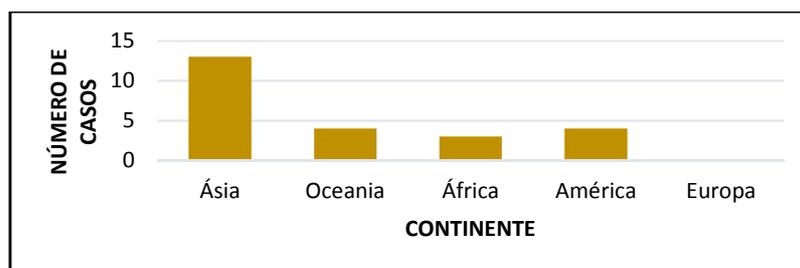


Figura 6 – Número de casos por continente. Fonte: Autor

Na Tabela 1, são exibidos casos em que foram utilizados drenos verticais pré-fabricados, solução mais adotada, seguida dos geossintéticos, na Tabela 2. A Tabela 3, mostra cenários em que foram empregadas colunas de *jet grouting*, estacas e pré-carregamento a vácuo. A Tabela 4 retrata os métodos de substituição de solo, berma de equilíbrio, aterro leve, sobrecarga, colunas de brita e areia. Essa última, reúne as técnicas menos aplicadas, diante da amostragem que foi estudada.

Salienta-se que esses artigos foram selecionados em uma única biblioteca virtual, a plataforma de periódicos da CAPES, para o período de divulgação entre 2012 e 2017. Foi estabelecido o critério de contabilizar apenas aqueles que citavam situações de obras reais.

Tabela 1 – Resumo das pesquisas realizadas sobre drenos verticais

SOLUÇÃO	REFERÊNCIA	FINALIDADE	LOCALIZAÇÃO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES
<b>DRENOS VERTICAIS PRÉ FABRICADOS</b>	Zuang e Cui (2016)	Rodovia	Jiangdong, China	- O recalque na superfície aumentou à medida que o comprimento e o coeficiente de permeabilidade aumentaram, e diminuiu com o aumento do espaçamento entre os PVDs.
	Rujikiatkamjorn e Indraratna (2015)	Rodovia	Ballina, Austrália	- O solo se tornou cada vez mais perturbado em direção ao dreno. - A compressibilidade do solo, o histórico de tensões e as características da zona perturbada foram fatores significativos que influenciaram a consolidação de argilas moles estabilizadas com PVD.
	Pajouh (2014)	Rodovia	Cumbalum, Austrália	- O máximo de poropressão ocorreu no final do processo de construção. - Os recalques calculados e medidos tiveram pouca diferença, sendo o observado em campo maior que o calculado, ao final da construção.
	Pajouh (2014)	Rodovia	Costa Sunshine, Austrália	- Em fase inicial, o recalque medido foi 60% menor que o previsto. - Em fase final, a diferença entre os recalques medidos e previstos foi de 10%.
	Pajouh (2014)	Porto	Chittagong, Bangladesh	- A maior parte dos recalques ocorreram na fase de pré-carga.
	Zhou (2016)	Ponte	Xangai, China	- Espaçamentos maiores entre drenos reduziram a taxa de assentamento; - A maior parte dos recalques ocorreram durante o período de pré-carregamento.
	Xue (2014)	Rodovia	Xangai, China	- Ocorreu aumento inesperado de poropressão e movimento horizontal em forma de arco no pé do talude; - A falha pode ter sido causada por uma desativação manual dos drenos durante a construção.
	Araújo et al. (2012)	Rodovia	Santa Catarina, Brasil	- Reduziu os deslocamentos horizontais na região das estacas da ponte mais próximas ao pé do aterro.
	Ni (2012)	Ferrovias	Sangdate, Austrália	- Atingiu um grau de consolidação de 90% em 1 ano; - Os PVDs diminuíram os movimentos laterais em 25-30%, de acordo com o espaçamento do dreno.
	Long (2015)	Rodovia	Ho Chi Minh, Vietnam	- A influência da espessura de PVD (3 mm ou 7 mm) foi desprezível. O PVD com 3 mm teve desempenho melhor que o de 7 mm.

Tabela 2 – Resumo das pesquisas realizadas sobre geossintéticos

SOLUÇÃO	REFERÊNCIA	FINALIDADE	LOCALIZAÇÃO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES
<b>GEOSSINTÉTICO</b>	Liu (2015)	Rodovia	Ningbo, China	- 13,6% do recalque final ocorreu durante o período de construção do aterro; - A relação poropressão/tensão vertical foi de 0,18, valor menor que o limite máximo de 0,34 recomendado. O aterro estava longe de falha;
	Benmebarek et. Al. (2015)	Rodovia	Chott El Hodna, Argélia	- O reforço acilitou grandemente a construção do aterro, sem recalques diferenciais significativos; - Quando a rigidez do geossintético variou de 500 a 2000 kN/m, reduz os recalque diferenciais na base do aterro.
	Schnaid (2017)	Ponte	Rio Grande Do Sul, Brasil	- O reforço foi útil para proporcionar drenagem e reduzir a poropressão em excesso na camada de argila; - Reduziu a magnitude dos recalques e a pressão horizontal máxima da terra que atua sobre estruturas adjacentes.

Taechakumthorn e Rowe (2012)	Aterro de ensaio	Quebec, Canadá	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não teve efeito benéfico significativo em termos de redistribuição da tensão de cisalhamento na fundação solo;</li> <li>- Não foi rígido suficiente para evitar o início da falha da fundação, e não foi forte para controlar a falha uma vez que iniciada.</li> </ul>
Zhang (2015)	Central nuclear	Qinshan, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O recalque máximo pôde ser reduzido em 10% a longo prazo;</li> <li>- Aumentou o fator de segurança.</li> </ul>
Araújo et al (2012)	Rodovia	Santa Catarina, Brasil	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Os resultados obtidos sugerem que as camadas de reforço não seriam necessárias.</li> </ul>
Cheng (2014)	Ferrovia	Chaoshan, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O alongamento da geogrelha aumenta com a altura de construção;</li> <li>- A taxa de assentamento e a tensão da geogrelha localizada no solo entre estacas são maiores do que os valores correspondentes no topo da estaca.</li> </ul>
Alston et al (2015)	Cais	Hamilton, Canadá	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Os recalques medidos foram cerca de 70 e 80% das previsões teóricas;</li> <li>- A solução resultou em uma economia de custo de cerca de 60% em comparação com o sistema de fundação inicialmente recomendado.</li> </ul>

Tabela 3 – Resumo das pesquisas realizadas sobre *jet grouting*, estacas e colunas de brita

SOLUÇÃO	REFERÊNCIA	FINALIDADE	LOCALIZAÇÃO	PRINCIPAIS CONCLUSÕES
<b>JET GROUTING</b>	Wang (2013)	Linha 11 Metrô	Xangai, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O deslocamento da superfície e lateral do solo foi menor que o máximo permitido;</li> <li>- A poropressão aumentou durante a injeção e diminuiu durante a remoção da haste;</li> </ul>
	Wu (2016)	Rodovia	Jiangsu, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O aterro foi elevado para compensar os assentamentos;</li> <li>- Os valores médios medidos em campo são cerca de 60% menores que os valores estimados.</li> </ul>
<b>ESTACAS</b>	Zhang et al (2015)	Ponte	Xangai, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O recalque foi acelerado com o aumento do diâmetro das colunas DM;</li> <li>- O grau de permeabilidade da coluna teve grande influência no recalque quando inferior a 1/100 do grau de permeabilidade do solo.</li> </ul>
	Zhou (2016)	Ferrovia	Pequim-Xangai, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desempenho satisfatório, devido ao arranjo triangular das estacas, ao grande diâmetro, à parede grossa da estaca e ao espaçamento entre elas.</li> </ul>
	Di et al (2016)	Metrô	Nanjing, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cerca de 75% do recalque total medido ocorreu nos dois primeiros anos;</li> <li>- A profundidade das estacas foi insuficiente.</li> </ul>
	Cheng (2014)	Ferrovia	Chaoshan, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A razão de tensão estaca-solo aumentou com o tempo e a carga;</li> <li>- Ao término da construção, a razão de tensão estaca-solo atinge 17, o que indica que a maioria da carga é suportada pelas estacas;</li> <li>- A tensão no solo entre estacas foi maior que a tensão no topo delas;</li> </ul>
<b>PRÉ CARREGAMENTO A VÁCUO</b>	Zuang e Cui (2016)	Rodovia	Jiangdong, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Atingiu grande parte do grau de consolidação final previsto ainda na fase de pré-carregamento à vácuo.</li> </ul>
	Long (2015)	Rodovia	Ho Chi Minh, Vietnam	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A consolidação à vácuo com membrana permitiu um grau de consolidação de mais de 90% em menos de 8 meses.</li> </ul>

Tabela 4 - Resumo das pesquisas realizadas sobre substituição de solo, berma de equilíbrio, aterro leve, sobrecarga, pré-carregamento a vácuo e colunas de areia

<b>SOLUÇÃO</b>	<b>REFERÊNCIA</b>	<b>FINALIDADE</b>	<b>LOCALIZAÇÃO</b>	<b>PRINCIPAIS CONCLUSÕES</b>
<b>SUBSTITUIÇÃO DE SOLO</b>	Ali (2015)	Aterro de ensaio	Borg Al-Arab, Egito	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduziu o recalque da fundação em cerca de 50% e aumentou a capacidade de carga em cerca de 100%;</li> <li>- A capacidade de carga aumentou com o aumento da espessura da camada de substituição de areia compacta.</li> </ul>
<b>BERMA DE EQUILÍBRIO</b>	Araújo et al (2012)	Rodovia	Santa Catarina, Brasil	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Foi utilizada devido à baixa resistência à tração da geogrelha na direção transversal;</li> <li>- O comprimento utilizado foi conservador. Metade desse comprimento seria suficiente.</li> </ul>
<b>ATERRO LEVE (GCM)</b>	Wijeyesekera (2016)	Rodovia	Johor, Malásia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduziu o recalque no solo em 41%, usando GCM com 0,6 m + 0,4 m de areia;</li> <li>- A estrutura celular do material leve inovador funcionou bem na redução da flutuação, permitindo o fluxo de água através dela.</li> </ul>
<b>SOBRECARGA</b>	Rujikiatkamjorn e Indraratna (2015)	Rodovia	Ballina, Austrália	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O solo se tornou cada vez mais perturbado em direção ao dreno.</li> <li>- A compressibilidade do solo, o histórico de tensões e as características da zona perturbada foram fatores significativos que influenciaram a consolidação de argilas moles estabilizadas com PVD.</li> </ul>
<b>COLUNAS DE AREIA</b>	Bouassida e Klai (2012)	Ponte	La Charguia, Tunísia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não funcionaram com sucesso como esperado;</li> <li>- O objetivo era obter um grau de consolidação de 90% em seis meses, mas os registros em campo mostraram apenas 80% durante oito meses.</li> </ul>
<b>COLUNAS DE BRITA</b>	Liu (2015)	Rodovia	Ningbo, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 13,6% do recalque final ocorreu durante o período de construção do aterro;</li> <li>- A relação poropressão/tensão vertical foi de 0,18, valor menor que o limite máximo de 0,34 recomendado. Assim, o aterro estava longe de falha;</li> <li>- O uso de tampas de coluna permite que quase o dobro da carga seja transferida para as colunas.</li> </ul>

## 5 - CONCLUSÃO

Este artigo fez uma revisão das soluções geotécnicas empregadas para atenuar problemas de recalque e ruptura em construções sobre solos moles, com o objetivo de reunir estudos de caso concretos e existentes em todo território mundial, nos quais foram aplicadas algumas destas soluções. A plataforma de pesquisa escolhida foi o Portal de Periódicos CAPES/MEC para o período estabelecido entre 2012 e 2017. As tabelas evidenciam que cada situação de reforço apresentou uma conclusão específica, que variou de acordo com o tipo de construção, os parâmetros geotécnicos do solo, os cuidados durante a execução e as limitações da própria solução. Em sua maioria, os resultados foram positivos e os métodos aplicados atingiram a expectativa desejada.

Baseado no que foi apresentado neste trabalho, fica evidente que o melhoramento em solos moles é possível quando se escolhe a técnica mais adequada para as condições impostas pelo solo e ambiente, e que é comum a prática conjunta entre algumas delas. Além disso, é extremamente necessário o monitoramento do reforço, para analisar se o solo irá resistir e suportar a carga a qual foi submetido, sem que ocorram falhas significativas. Caso ocorram, uma intervenção deverá ser realizada para desacelerar os danos. Diante do exposto, percebe-se que a busca por novas soluções e aprimoramento das técnicas já existentes tem crescido bastante, visando atingir e melhorar um número cada vez maior de regiões sobre solos moles e, assim, permitir o maior desenvolvimento territorial de todas as nações.

## 6 - REFERÊNCIAS

- Al Saudi, N.K.S., Al-Gharbawi, A.S.A., Rajab, N.A.A. e G, T. (2016) - Sand and stone columns in soft soil at different relative densities. *The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Ali, N. A. (2015) - Performance of partially replaced collapsible soil – Field study. *Alexandria Engineering Journal*.
- Almeida, M. de S. S. e Marques, M. E. S. (2010) - *Aterros sobre solos moles - Projeto e Desempenho*. São Paulo, Ed. Oficina De Textos.
- Alston, C., Lowry, D. K. e Lister, A. (2015) - Geogrid reinforced granular pad foundation resting on loose and soft soils, Hamilton Harbour, Ontario. *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.*
- Araújo, G. L. S., Palmeira, E. M. e Macêdo, I. L. (2012) - Comparisons between predicted and observed behaviour of a geosynthetic reinforced abutment on soft soil. *Engineering Geology*. 147-148, p.101-113.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOSSINTÉTICOS. IGS, Brasil. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/os-geossinteticos>>. Acesso em 04 maio, 2017.
- Benmebarek, S., Berrabah, F. e Benmebarek, N. (2015) - Effect of geosynthetic reinforced embankment on locally weak zones by numerical approach. *Computers and Geotechnics* 65. 115–125.
- Bouassida, M. e Klai, M. (2012) - Challenges and improvement solutions for Tunis' soft clay. *Int. J. of GEOMATE, Sept., 2012, Vol. 3, No. 1 (Sl. No. 5), pp. 298-307*.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *EN 12.716: Execution of special geotechnical works — Jet grouting*. London, 2001.
- Cheng, Q., Wu, J., Zhang, D. e Ma, F. (2014) - Field testing of geosynthetic-reinforced and column-supported earth platforms constructed on soft soil. *Front. Struct. Civ. Eng.* 8(2): 124–139.
- COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR. *Portal de Periódicos Capes*. Brasil. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: abril e maio, 2017.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. *DNER-PRO 381/98: Projeto de Aterros Sobre Solos Moles Para Obras Viárias*. Rio de Janeiro, 1998.
- Di, H., Zhou, S., Xiao, J., Gong, Q. e Luo, Z. (2016) - Investigation of the long-term settlement of a cut-and-cover metro tunnel in a soft deposit. *Engineering Geology* 204, 33–40.
- Etezad, M., Hanna, A.M. e Ayadat, T. (2014) - Bearing Capacity of a Group of Stone Columns in Soft Soil. *International Journal of Geomechanics*.
- Futai, M.M. (2010) - *Considerações Sobre a Influência do Adensamento Secundário e do Uso de Reforços em Aterros Sobre Solos Moles*. Tese. Doutorado. Universidade de São Paulo, 2010.
- Hejazi, S.M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S.M. e Zadhoush, A. (2012) - A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials* 30, 100–116.

- Leroueil, S. (1997) - *Critical State Soil Mechanics and Behavior of Real Soils, Recent Development and Soil and Pavement Mechanics*. Ed. Almeida. Balkema.
- Liu, H., Kong, G., Chu, J. e Ding, X. (2015) - Grouted gravel column-supported highway embankment over soft clay: case study. *Can. Geotech. J.* 52: 1–9.
- Long, P. V., Nguyen, L.V., Bergado, D.T. e Balasubramaniam, A.S. (2015) - Performance of PVD improved soft ground using vacuum consolidation methods with and without airtight membrane. *Geotextiles and Geomembranes* 1 e 11.
- Massad, F. (2010) - *Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia*. 2ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Ni, J. (2012) - *Application of geosynthetic vertical drains under cyclic loads in stabilizing tracks*. Thesis. Doctorate degree. University of Wollongong.
- Pajouh, A.P. (2014) - *Analysing Ground Deformation Data to Predict Characteristics of Smear Zone Induced by Vertical Drain Installation for Soft Soil Improvement*. Thesis. Doctorate degree. University of Technology Sydney.
- Palmeira, E. M. (1999) - "Aterros Reforçados com Geossintéticos Sobre Solos Moles". In: Geossintéticos 99, v.2, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Palmeira, E. M., Fahel, A. R. S. e et al. (2012) - Behaviour of Geogrid Reinforced Abutments on Soft Soil. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, v.43.
- Patriarca, M. A. A. (2012) - *Utilização De Materiais De Aterro Leves No Domínio Das Obras Geotécnicas*. Dissertação. Mestrado. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.
- Pinto, C.S. (2006) - *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. 3ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Reis, C. A. e Ramos, R. M. (2009) - *A geoleca e solução aterro leve*. Seminário Geoleca – Utilização de Agregados Leves Leca em Geotecnia. Lisboa.
- Rujikiatkamjorn, C. e Indraratna, B. (2015) - Analytical Solution for Radial Consolidation Considering Soil Structure Characteristics. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Schnaid, F., Winter, D., Silva, A.E.F., Alexiew, D. e Küster, V. (2017) - Geotextile encased columns (GEC) used as pressure-relief system. Instrumented bridge abutment case study on soft soil. *Geotextiles and Geomembranes* 1e10.
- Taechakumthorn, C. e Rowe, R. K. (2012) - Performance of a reinforced embankment on a sensitive Champlain clay deposit. *Can. Geotech. J.* 49: 917-927.
- Teixeira, C.F. (2012) - *Análise dos Recalques de um Aterro Sobre Solos Muito Moles da Barra da Tijuca – RJ*. Tese. Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Wang, Z. F., Shen, S.L., Ho, C.E. e Kim, Y.H. (2013) - Investigation of field-installation effects of horizontal twin-jet grouting in Shanghai soft soil deposits. *Can. Geotech. J.* 50: 288–297.
- Wijeyesekera, D. C., Numbikannu, L., Ismail, T.N.H.T. e Bakar, I. (2016) - Mitigating Settlement of Structures founded on Peat D. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 136.
- Wu, Y. D., Diao, H.G., Ng, C.W.W., Liu, J. e Zeng, C.C. (2016) - Investigation of ground heave due to Jet Grouting in Soft Clay. *Journal of Performance of Constructed Facilities*.
- Xue, J.F., Chen, J.F., Liu, J.X., Shi, Z.M. (2014) - Instability of a geogrid reinforced soil wall on thick soft Shanghai clay with prefabricated vertical drains: A case study. *Geotextiles and Geomembranes* 1e10.
- Zhang, N., Shen, S.L., Wu, H.N., Chai, J.C., Xu, Y.S. e YIN, Z.Y. (2015) - Evaluation of effect of basal geotextile reinforcement under embankment loading on soft marine deposits. *Geotextiles and Geomembranes* 43, 506e514.
- Zhang, Z., Ye, G. e Xing, H. (2015) - Consolidation analysis of soft soil improved with short deep mixed columns and long prefabricated vertical drains (PVDs). *Geosynthetics International*, 22, No. 5.
- Zhou, M., Liu, H., Chen, Y. e HU, Y. (2016) - First application of cast-in-place concrete large-diameter pipe (PCC) pile-reinforced railway foundation: a field study. *Can. Geotech. J.* 53: 708–716.
- Zhuang, Y. e Cui, X. Y. (2016). Evaluation of Vacuum Preloading With Vertical Drains as a Soft Soil Improvement Measure. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 53, No. 3.