

2 Técnicas de melhoramento de solos

Investigações geotécnicas permitem identificar e analisar regiões, camadas, ou depósitos de solo em condições desfavoráveis, possibilitando que medidas de engenharia possam ser tomadas para seu melhoramento e, dessa forma, permitir a execução de projetos de construção nestes locais.

Existem várias tecnologias aplicáveis ao melhoramento de solos fofos, variando desde uma simples compactação mecânica até um sofisticado tratamento de congelamento do terreno. No entanto, a opção por determinado tratamento poucas vezes satisfaz todos os requerimentos de custo, qualidade e eficiência.

A injeção com argamassa é uma destas tecnologias frequentemente utilizadas para melhoramento de solos e, segundo Hussin (2006), pode ser subdividida em três categorias, esquematizadas na Figura 2.1.

1. Compactação - usadas para compactar ou densificar o solo *in-situ*;
2. Reforço – inclusão de elementos de reforço na massa do solo sem alterar necessariamente suas propriedades;
3. Fixação – processo de ligação das partículas de solo, aumentando sua resistência e diminuindo a compressibilidade e permeabilidade.

Algumas técnicas para o tratamento de solos fofos são apresentadas a seguir.

2.1. Técnicas de vibração

O uso de vibradores para densificação de solos iniciou na Alemanha em meados dos anos 1930. Os imigrantes russos Sergei Stevermann e Wilhelm Degen tiveram a ideia de compactar solos não coesivos acima e abaixo do lençol freático, posicionando o vibrador na profundidade requerida de compactação. O equipamento de vibração fica diretamente em contato com o solo enquanto vai lhe aplicando forças vibratórias horizontais (Griffith, 1991).

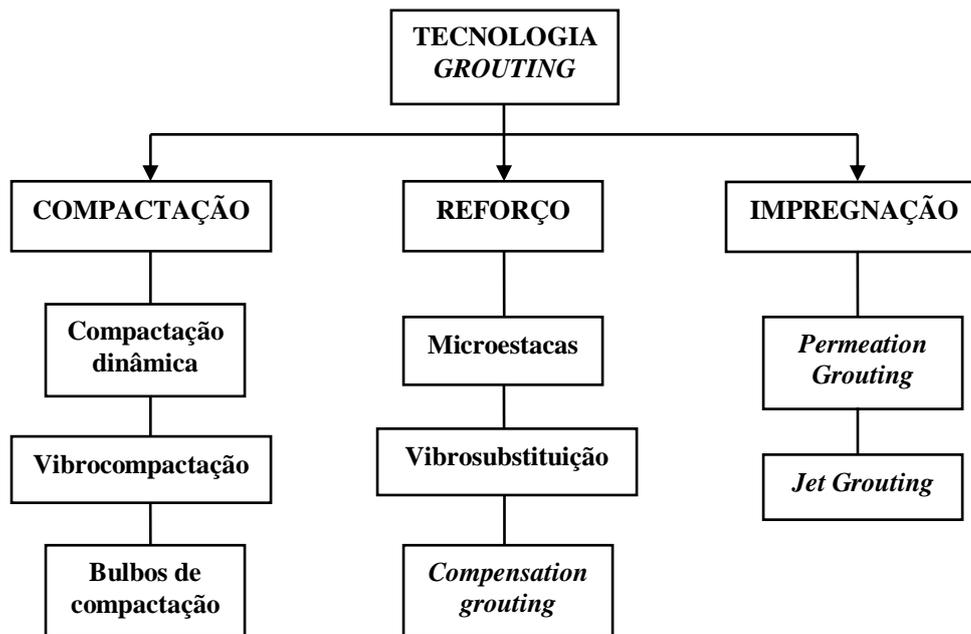


Figura 2.1-Esquemas de diferentes categorias da tecnologia de injeção com argamassa.

As técnicas de vibração mais usadas são a vibrocompactação e a vibrosubstituição.

2.1.1. Vibrocompactação

A vibrocompactação consiste na introdução de um vibrador no depósito de solo, por meio de vibração e lançamento de água sob pressão através da ponta do vibrador (Figura 2.2a). As vibrações transmitidas ao solo provocam um movimento horizontal, de frequência igual a do vibrador e de amplitude variável de acordo com a sua potência.

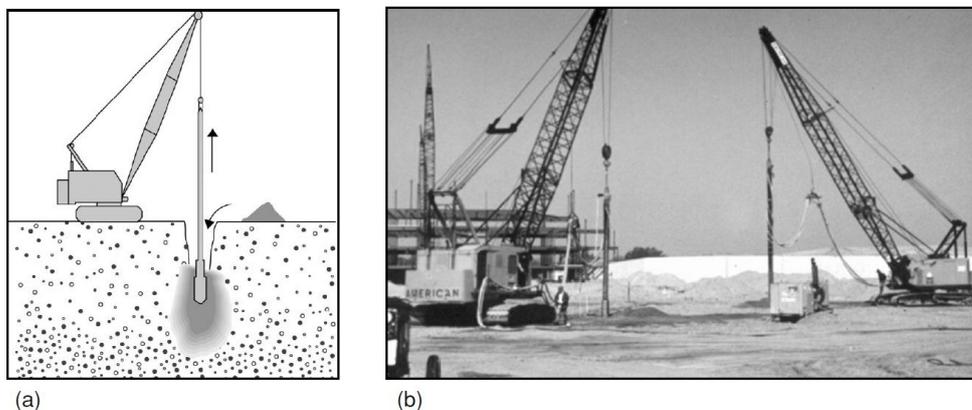


Figura 2.2 - Vibrocompactação: (a) esquema da técnica, (b) execução em campo. (Fonte: Hussin, 2006).

Em consequência da aplicação da vibrocompactação em solos granulares, a gravidade produz um reordenamento de partículas tornando a estrutura do solo mais densa (Figura 2.3).

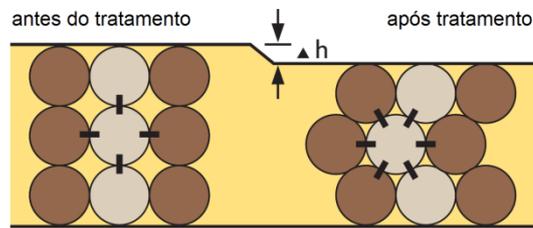


Figura 2.3 - Modificação da estrutura do solo por vibrocompactação.

A compactação produz uma diminuição de volume do solo (densificação), o qual é preenchido por um material arenoso de proveniência externa ou por material do mesmo terreno (Figura 2.4), consistindo de areias com teores de silte inferior a 10% sem argila, mas eventualmente podendo conter pedregulhos. A vibrocompactação é recomendada para solos granulares com teor de finos inferior a 10-15%, abaixo do lençol freático, podendo ser aplicada a profundidades de até 20m. Esta técnica é utilizada também na redução da subsidência sísmica e potencial de liquefação, permitindo a construção sobre depósitos de solos granulares fofos (Griffith, 1991 e Hussin, 2006).

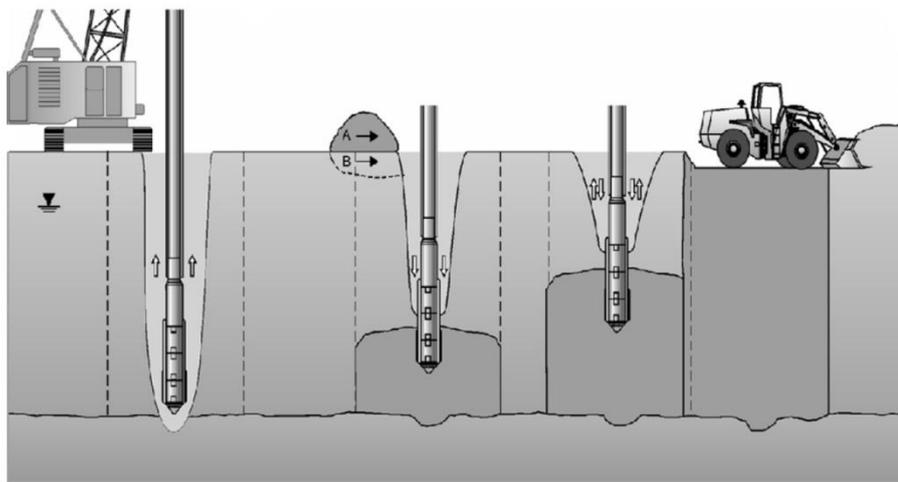


Figura 2.4 - Esquema do processo de execução de vibrocompactação (Hussin, 2006).

2.1.2. Vibrosubstituição

É uma técnica de processo construtivo similar à vibrocompactação, porém aplicada para depósitos de solos com teor de finos superior a 15%. A vibrosubstituição consiste na execução de colunas de pedregulho ou de areia para melhoramento do solo, fazendo uma verdadeira substituição de materiais nos pontos de tratamento (Wehr *et al.*, 2010), como ilustram as Figura 2.5 e Figura 2.6.

O vibrador penetra até a profundidade prevista e o furo resultante é preenchido com um material granular sem finos. Em alguns casos o processo é auxiliado por jatos de água que eliminam os finos, em solos saturados, ou com auxílio de ar comprimido, em solos secos.

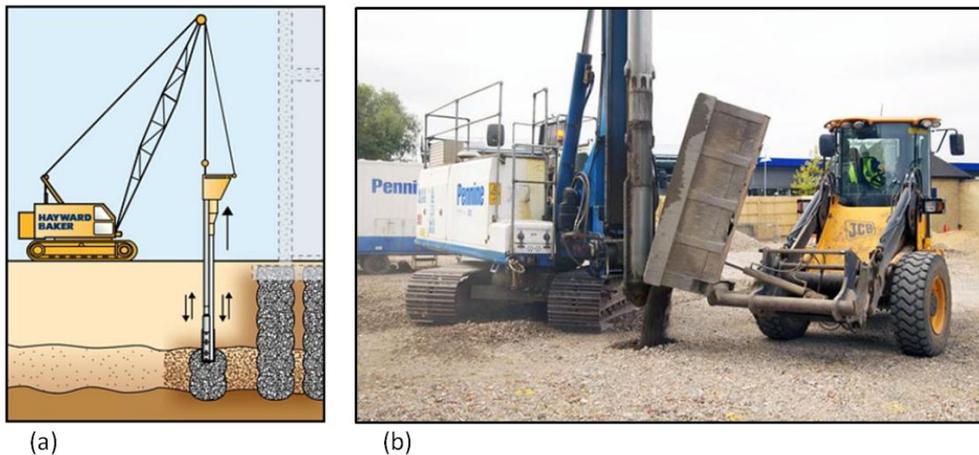


Figura 2.5 - Vibrosubstituição: (a) esquema da técnica, (b) execução em campo (<http://www.nce.co.uk>)

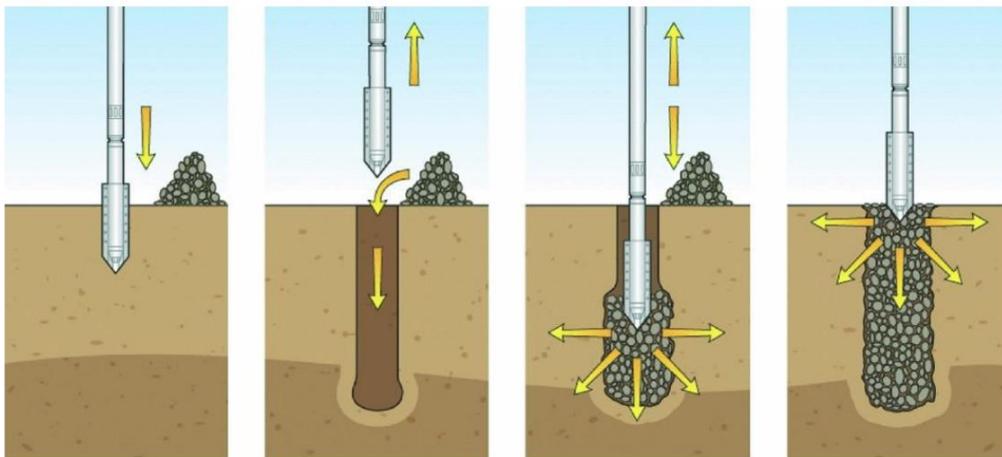


Figura 2.6 - Esquema do processo de execução da vibrosubstituição (<http://www.oyp.ucsc.cl/6/rodriguez1/Rodriguez/assets/seo/page2.html>).

O material de substituição é densificado por vibração, resultando em um elemento de reforço que torna o depósito de solo mais rígido. De acordo com Griffith (1991), com base nas pesquisas de Datye (1982) e Mitchell (1981), a redução do recalque pode chegar a 40% em comparação com recalques observados em áreas sem tratamento. As colunas com material de substituição podem ser utilizadas como suporte de estruturas ou aproveitadas como drenos verticais para acelerar o adensamento de solos finos.

A viabilidade da técnica de vibração depende principalmente da granulometria do solo em tratamento. Uma comparação das faixas granulométricas recomendadas para utilização de ambas as técnicas (vibrosubstituição ou vibrocompactação) é mostrada na Figura 2.7.

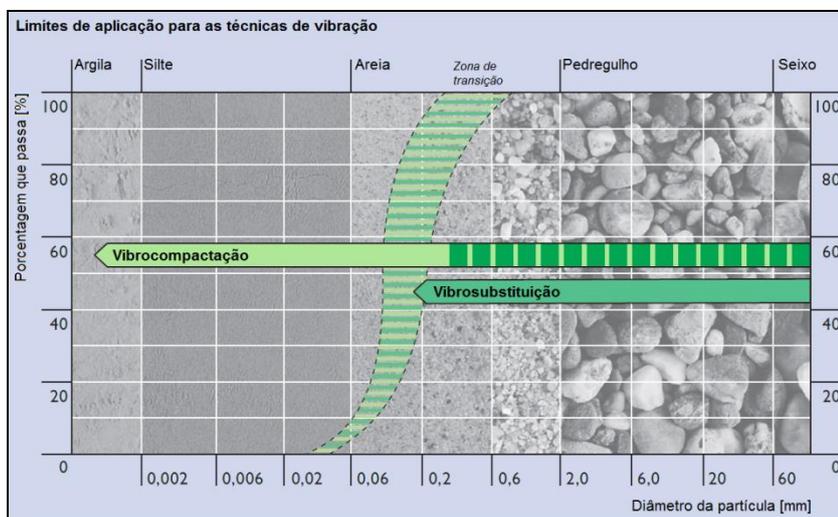


Figura 2.7 - Granulometria de tipos de solo tratados por vibrocompactação e vibrosubstituição.

2.2. Jet Grouting

Jet grouting pode ser aplicável em todos os tipos de solo. Consiste na injeção de calda de cimento sob altas pressões (de 20 a 40 MPa), sem escavação prévia, por meio de jatos horizontais, provenientes da transformação da energia potencial de bombeamento da calda em energia cinética, com a capacidade de desagregar a estrutura do solo natural e misturar as partículas do solo com a calda de cimento, formando um material resultante com melhores características mecânicas e de menor permeabilidade do que o original.

Esta técnica combina movimentos de rotação e de translação ascendente da haste com os bicos jateadores, formando colunas cilíndricas de solo-cimento cujo diâmetro e resistência estão em função da característica do terreno e do método de execução. A Figura 2.8 apresenta um esquema geral de *jet grouting*.

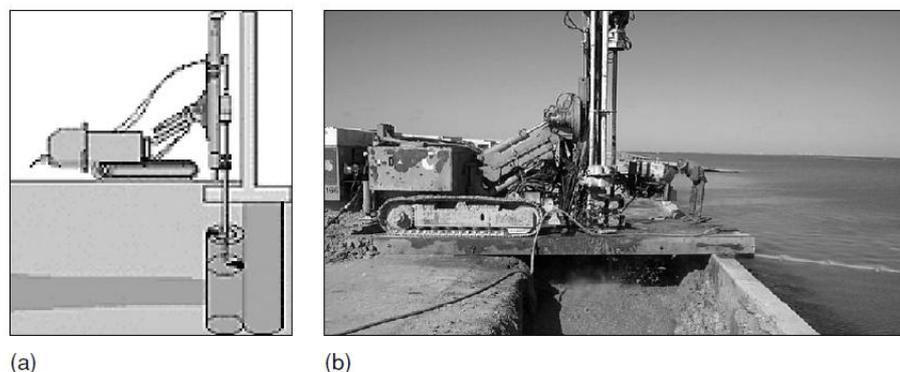


Figura 2.8 - Jet Grouting: (a) esquema de uma coluna de jet grouting e (b) execução em campo. (Fonte: Hussin, 2006).

No mercado brasileiro existem três sistemas de execução desta técnica, os quais são denominados como Simples (CCP), Duplo (JSG ou JG) e Triplo (CJG). A seleção do tipo de sistema de injeção deve levar em consideração as características do terreno, o objetivo da intervenção, o prazo de execução da obra e dos custos associados. Estes três sistemas tem as seguintes características (Hussin, 2006; Ribeiro, 2010):

- O sistema simples (CCP) utiliza em seu bico de injeção apenas uma haste de aço para jateamento da calda de cimento, sem emprego de ar comprimido, formando, desta maneira, colunas de diâmetros menores. Neste processo, uma haste dupla pode ser usada para maior cobertura, porém ainda sem uso de ar comprimido (Figura 2.9a). Geralmente é utilizado em abóbadas de túneis e na “impermeabilização” de solos e ancoragens.
- O sistema duplo (JSG ou JG) utiliza duas hastes coaxiais: a calda de cimento circula pela vara interna sob elevada pressão, enquanto o ar comprimido passa pelo espaço anelar entre as duas varas, obtendo-se desta forma colunas de diâmetros maiores do que aquelas que seriam conseguidas sem o emprego de ar comprimido (Figura 2.9b). Este sistema é utilizado em estabilização de solos, execução de painéis “impermeabilizantes” e reforço de fundações.

- O sistema triplo (CJG) utiliza três hastes coaxiais (água, ar comprimido e calda de cimento), e dois bicos jateadores. No bico jateador superior injeta-se água sob pressão elevada, envolvida por ar comprimido, e no bico inferior injeta-se a calda de cimento sob pressões mais baixas, obtendo-se colunas de grande diâmetro, de até 3 m, conforme ilustra a Figura 2.9c.

Este método tem como princípio básico a separação das duas ações, tanto de erosão (resultante do jato de água e ar comprimido) quanto de preenchimento (ou mistura) da calda de cimento com o solo desagregado. Cada jato apresenta uma função distinta neste sistema:

- Jato de água – utilizado para erodir o solo;
- Jato de ar - injetado através do mesmo bico de injeção de água para aumentar o seu efeito de erosão;
- Jato de cimento - injetado através de um segundo bico, posicionado abaixo do bico de água e ar comprimido, misturando a calda de cimento com o solo que permanece na cavidade após a passagem do jato de água e ar comprimido, dando origem a um material solidificado.

Em geral, o sistema triplo é utilizado em reforço de fundações e em escavações, para a diminuição da permeabilidade e na estabilização de maciços de solo. Pelo elevado custo da bomba, não é muito empregada no Brasil (TECNOGEO).

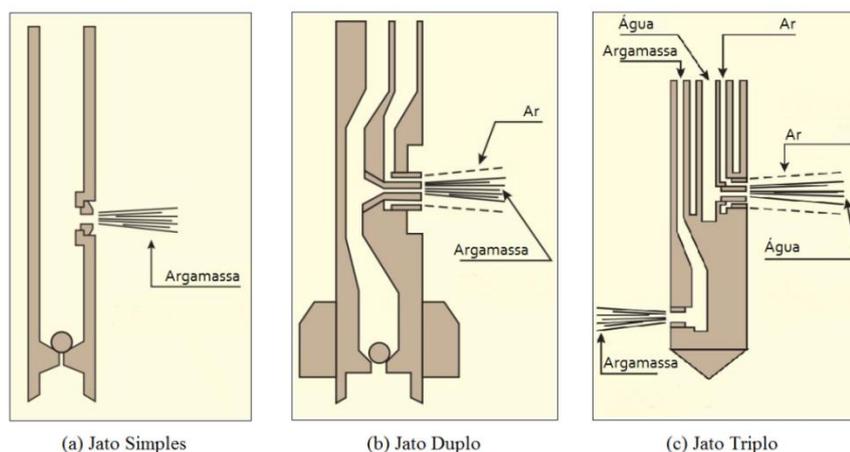


Figura 2.9 - Esquema de hastes nos sistemas de execução de jet grouting: (a) simples (CCP), (b) duplo (JSG ou JG) e (c) triplo (CJG). (Fonte: Roberto, 2012).

Solos granulares são mais erodíveis do que as argilas plásticas e, portanto, esta técnica é mais efetiva neste tipo de solo. Como o solo é um dos componentes da mistura final, o solo também afeta na resistência da mistura final solo-cimento, denominada de *soilcrete* (Hussin, 2006). Em solos orgânicos e turfosos, ou solos contaminados, não se recomenda o uso desta técnica porque podem conter substâncias que dificultem a reação do cimento injetado com o solo, prejudicando o melhoramento esperado (Nogueira, 2010).

Pereira (2008) descreve uma aplicação deste sistema como reforço em escavação de túnel para a construção da estação Cais do Sodré em Lisboa enquanto que Andrus e Chung (1995) apresentaram casos para mitigação do potencial de liquefação na usina de energia de Sacramento (Califórnia) e na estação do metrô de Taipei (Taiwan), construídas sobre solos arenosos suscetíveis à liquefação. A Figura 2.10 apresenta outras possíveis aplicações de *jet grouting*.

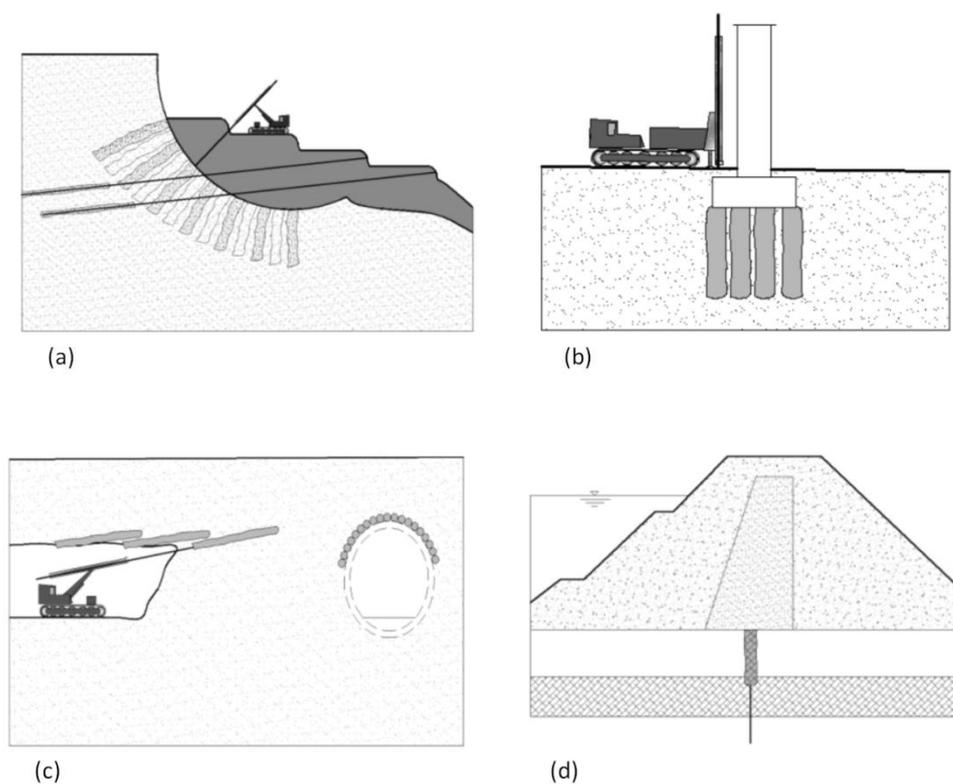


Figura 2.10 - Utilização da técnica de jet grouting: (a) estabilização de taludes; (b) reforço de fundações; (c) aplicação sub-horizontal em reforço de túneis; (d) cortina impermeável em fundação de barragem. (Fonte: Roberto, 2012).

2.3. Permeation Grouting

Consiste na injeção de argamassa de baixa viscosidade através dos poros do solo fofo, sem alterar sua estrutura. A técnica (Figura 2.11) é geralmente utilizada para reduzir a permeabilidade do maciço e controlar o fluxo da água, mas também pode ser executada para aumentar a resistência do solo.

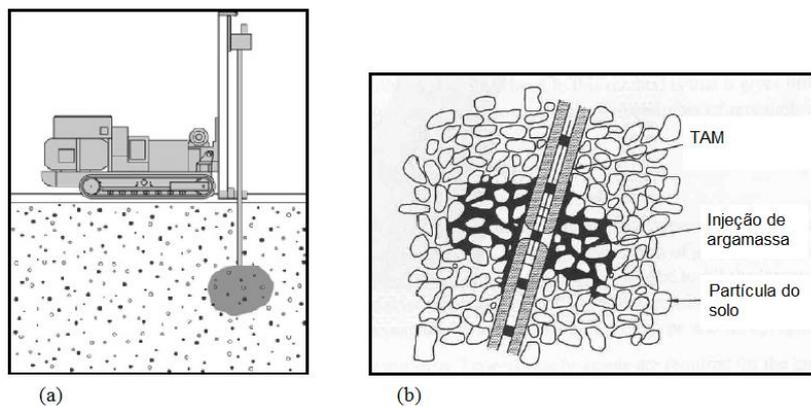


Figura 2.11 - Permeation grouting: (a) esquema da técnica, (b) detalhe do escoamento da argamassa injetado através dos vazios do solo. (Fonte: Hussin, 2006 e Henriquez, 2007).

A argamassa pode ser constituída por calda de cimento ou soluções químicas, sendo a mais utilizada o silicato de sódio. Pressões e taxas de injeção excessivas podem ocasionar o fraturamento do solo, recomendando-se que as pressões de injeção sejam mantidas em cerca de 25% da pressão de fraturamento, determinada previamente em ensaios de campo (Andrus e Chung, 1995).

O processo de injeção pode ser realizado mediante perfuração de um tubo com revestimento, liberando-se a argamassa através da sua cavidade inferior, em estágios de 0,3m a 0,9m em direção à superfície. Adicionalmente, a injeção da argamassa também pode ser realizada por meio de tubos de injeção (*tubes a manchettes* - TAM) que são tipicamente usados na técnica de *compensation grouting*, descrita a seguir.

A aplicabilidade do *permeation grouting* é principalmente para solos granulares (areias e pedregulhos) com teores de silte menores do que 18% e de argila menores do que 2%. A profundidade do lençol freático não é crítica uma vez que a água é expulsa à medida que a argamassa é injetada (Hussin, 2006). Tem sido utilizada com sucesso para controlar o fluxo de água, na estabilização de

escavações em solos fofos, na sustentação de fundações e para prevenção de recalques devido à liquefação dinâmica (Andrus e Chung, 1995).

2.4. Compensation Grouting

A técnica de *compensation grouting* consiste no fraturamento hidráulico deliberado do solo mediante a injeção de argamassa sob pressão, sendo o mesmo forçado a escoar através das fissuras naturais preexistentes, ou geradas pelo processo de injeção, causando uma expansão da argamassa no interior do maciço de solo, conforme ilustra a Figura 2.12. Estas fissuras se propagam na direção perpendicular à tensão principal menor, i.e. a fratura é vertical em solos normalmente adensados e horizontal em solos pré-adensados. Para solos normalmente adensados a tensão vertical é maior do que a tensão horizontal, o qual resulta em fraturas orientadas na direção vertical. Como resultado dessas fraturas verticais, a tensão horizontal do solo se incrementa até exceder a tensão vertical. A partir deste ponto, existirá predomínio das fraturas horizontais que ocasionará o levantamento do terreno (Bezuijen, 2010) como mostrado na Figura 2.13. Há também que se considerar a influência da anisotropia do solo nas direções das fraturas (Essler *et al.*, 2000).

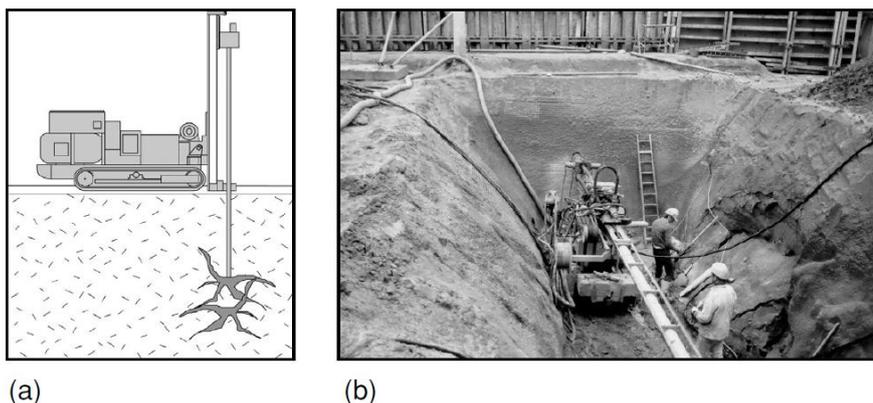


Figura 2.12 - Compensation grouting: (a) esquema da técnica, (b) execução em campo. (Fonte: Hussin, 2006).

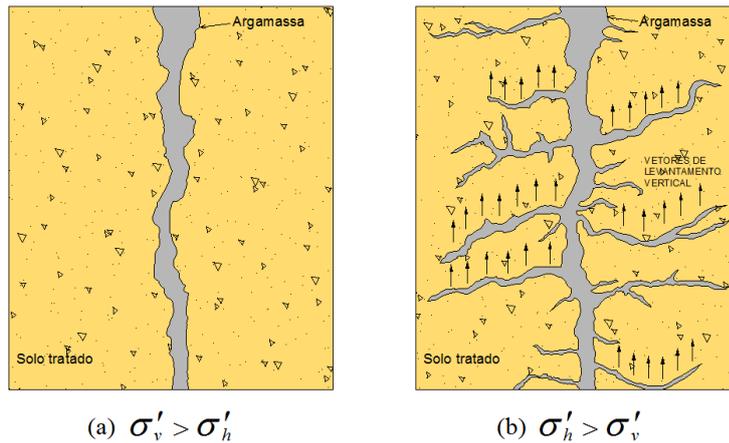


Figura 2.13 – Fraturas originadas pela injeção de argamassa: (a) início do tratamento; (b) durante o tratamento (levantamento do terreno)

Sua execução envolve a instalação de tubos de injeção de argamassa denominados tubes a manchetes (ou TAM, Figura 2.14a), que consistem em tubos de aço com mangas de borracha separadas de certa distância, que impedem a penetração do solo no tubo de injeção. Este tubo está também equipado com dois vedadores (*packers*) e uma mangueira para o escoamento da argamassa, como mostrado na Figura 2.14b (Bezuijen, 2010). Para permitir o processo de injeção a dupla de vedadores sela o tubo (TAM) em ambos os lados, permitindo assim a injeção de argamassa individualmente em cada tubo através da manga de borracha.



Figura 2.14 - Esquema do equipamento para execução da técnica compensation grouting: (a) tubos de injeção (TAM); (b) componentes do TAM. (Fonte: Bezuijen, 2010).

O objetivo principal das técnicas de *permeation grouting*, *jet grouting* e *compaction grouting* está baseado no aumento da resistência do solo. No entanto, no caso de *compensation grouting* pretende-se expandir o solo para eliminar,

reduzir ou prevenir recalques em estruturas. Esslet *et al.* (2000) reportaram aplicações desta técnica para a prevenção de recalques no projeto do túnel *St. Clair River*, no Canadá, no prolongamento da *Jubilee Line* do metropolitano de Londres e no sistema de metrô *Docklands Light Railway*, também em Londres.