

3

Bulbos de compactação

Diferentemente das técnicas mencionadas no capítulo anterior, a técnica de bulbos de compactação (em inglês *compaction grouting*) utiliza uma massa de argamassa mais rígida, de baixa mobilidade, que ao ser injetado se expande como uma massa homogênea, deslocando e compactando o solo circundante. Esta técnica induz o aumento da resistência ao cisalhamento e da rigidez do solo mediante um processo de injeção lenta e controlada, que não permite o fraturamento do solo, nem o escoamento da argamassa através dos vazios do solo (Graf, 1969; Warner e Brown, 1974 e ASCE, 2010).

Este sistema é executado tipicamente de modo ascendente (*bottom-up*) começando da base da camada em tratamento. O processo de injeção não precisa ser contínuo até a superfície, podendo ser finalizado a qualquer profundidade formando bulbos individuais que vão se unindo, criando deste modo elementos estruturais em forma de coluna (Figura 3.1). A Figura 3.2 apresenta um esquema da execução deste sistema.



Figura 3.1 - Coluna formada com a técnica de bulbos de compactação (ASCE, 2010).

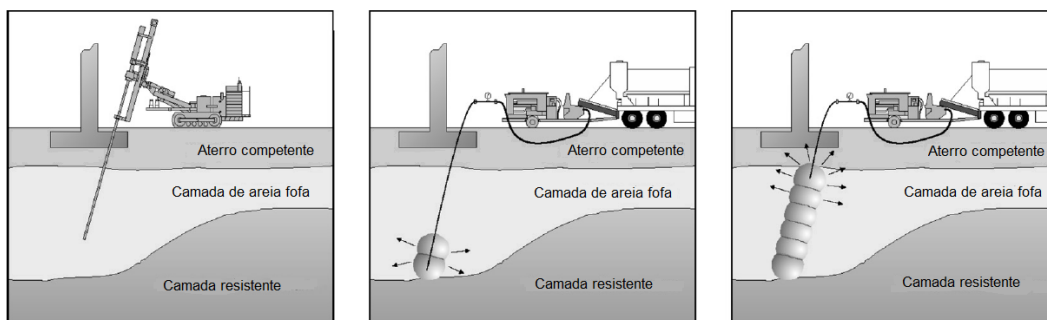


Figura 3.2 - Esquema do processo de execução da técnica de bulbos de compactação (Fonte: Hussin, 2006).

Como já mencionado, o princípio básico desta técnica consiste na injeção de argamassa de baixa mobilidade sob uma pressão elevada para formação de bulbos que podem tomar uma forma cilíndrica ou esférica.

Conforme a expansão da massa de argamassa acontece, o solo circundante é sujeito a um incremento de tensões normais, que o comprime, e de tensões cisalhantes que, em solos fofos, tende a provocar uma diminuição de seu volume. Em solos densos, o material experimentaria um incremento de volume sob cisalhamento, denominado dilatância, e por esta razão tais solos não são adequados para execução dos bulbos de compactação, técnica tipicamente recomendada para solos arenosos fofos. Solos finos, tais como argilas de alta plasticidade, particularmente abaixo do lençol freático, também não são adequados (Hussin, 2006 e ASCE, 2010).

A Figura 3.3 mostra a influência do tipo de solo na forma da coluna de argamassa. Em um solo denso ocorreria a redução do diâmetro da coluna em consequência do fenômeno da dilatância enquanto que em um solo fofo aconteceria a expansão da coluna, devido à compactação do material vizinho, com deslocamento de partículas e diminuição dos vazios do solo.

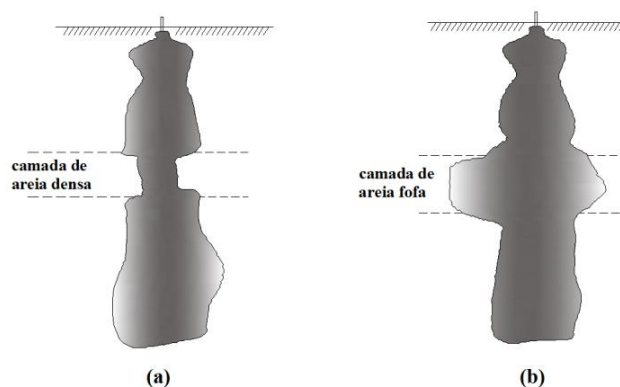


Figura 3.3 - Influência do tipo do solo na forma da coluna de argamassa (ASCE, 2010).

Dentre as características do tratamento de solos por bulbos de compactação podem ser mencionadas as seguintes (Graf, 1992, Warner e Brown, 1974 e ASCE, 2010):

- significativa melhoria em solos fofos ou colapsíveis, com valores de N_{SPT} entre 0 a 15-20;
- compensação de recalques em estruturas;
- mitigação do potencial de liquefação;
- melhoramento da resistência lateral de estacas ou de outras fundações quando a injeção é executada em zonas vizinhas;
- em construções subterrâneas (túneis) a densificação do solo reduz a ocorrência de recalques na superfície do terreno.

A técnica de bulbos de compactação é uma das mais usadas para melhoramento de solos granulares fofos por sua facilidade de execução, versatilidade e eficiência. Seu custo é baixo em relação a outras técnicas similares, não produz efeitos ambientais adversos e os resultados obtidos com sua aplicação em diversas obras reportadas na literatura (Geraci, 2005; Andrus e Chung, 1995) mostraram-se bastante satisfatórios.

3.1. Desenvolvimento da técnica

A primeira utilização da técnica de bulbos de compactação para melhoramento de solos parece ter acontecido nos Estados Unidos em 1952, quando James Warner utilizou o bombeamento de calda de cimento para

preencher cavidades em areia fina, sob uma estrutura de concreto, criadas por uma inundação.

A partir deste caso de sucesso, no final da década de 1950 a utilização de argamassa de baixa mobilidade para preencher cavidades se tornou um sistema comum nos Estados Unidos para compensar recalques de estruturas.

Como técnica de melhoramento de solos, a primeira menção foi feita por Graf (1969) que observou que, além do levantamento de estruturas, a técnica também melhorava as características de resistência do solo vizinho aos bulbos em decorrência da compactação.

A descoberta bem sucedida do uso de argamassa para diferentes aplicações motivou o início de programas de investigação mais detalhados, com ensaios sendo realizados e seus resultados minuciosamente verificados. Embora na época o termo *displacement grouting* tenha sido também utilizado, com o tempo a denominação *compaction grouting* foi gradualmente adotada. Warner e Brown (1973) investigaram a relação taxa de injeção versus quantidade de argamassa, a relação entre pressão e profundidade de injeção com a quantidade de argamassa, a influência do tipo de solo e a definição de parâmetros para quantificar o melhoramento do solo.

No início da década de 1980 a técnica também começou a ser aplicada para solução de problemas causados por excitações sísmicas, especificamente o tratamento de terrenos com potencial de liquefação. Mais recentemente, estudos sobre o comportamento e eficiência da mesma foram desenvolvidos tanto em laboratório quanto em campo. El-Kelesh e Matsui (2002) utilizaram-na no melhoramento do subsolo das pistas do Aeroporto Internacional de Tóquio, constatando um significativo efeito na redução da compressibilidade do solo granular resultante do processo de injeção. Aqueles autores concluíram que o mecanismo de injeções com argamassa depende fortemente da profundidade de injeção, confirmando as observações de Graf (1969, 1992) sobre a ocorrência de deslocamentos verticais na superfície do terreno no caso de injeções pouco profundas.

3.2.

Aplicação da técnica em campo

A aplicação em campo requer três fases de execução. A primeira necessita conhecer as condições do solo e uma estimativa da relevância da aplicação de bulbos de compactação no melhoramento do mesmo. A segunda fase define o procedimento de execução propriamente dito e na terceira fase são verificados os resultados do procedimento, comparando os valores de certos parâmetros do solo medidos antes e após a aplicação dos bulbos de compactação.

Fase 1 – Conhecimento das condições do solo

A fase geralmente requer explorações em campo, incluindo execução de ensaios *in-situ*, complementados por ensaios de laboratório. Deve-se verificar a presença de obstruções, tais como pedregulhos ou detritos que possam dificultar o processo de perfuração e, conseqüentemente, a injeção de argamassa. Para obtenção das propriedades geotécnicas básicas do solo são realizados ensaios de caracterização (teor de umidade, peso específico, índice de vazios, distribuição granulométrica). A densidade relativa do solo é usualmente estimada por meio do *ensaio de penetração dinâmica* (SPT) em sondagens de simples reconhecimento, de forma indireta ou avaliando diretamente em campo por meio do ensaio de cone de areia.

Fase 2 – Execução em campo

O processo de execução dos bulbos de compactação (Figura 3.4) é descrito a seguir com base nas recomendações da ASCE (2010) e Hussin (2006):

1. Instalação dos tubos de injeção - posicionados para transportar a argamassa até o ponto de formação de bulbos dentro da camada de solo. São instalados por meio de um equipamento de perfuração ou vibromartelo, dependendo das condições do solo.
2. Bombeamento - injeção controlada de argamassa para a formação de bulbos. Dois métodos de injeção podem ser usados, o ascendente (*bottom-up*) e o método descendente (*top-down*), com bulbos individuais se unindo para criar colunas estruturais. As taxas de bombeamento da argamassa em cada fase de injeção devem ser previamente definidas.

3. Padrão das colunas de injeção - o arranjo comumente considerado para a cravação dos furos e injeção de argamassa segue uma malha quadrada ou triangular, com os tubos de injeção reutilizados para a execução de diferentes colunas. A sequência dos trabalhos de injeção se inicia pelo furo de injeção denominada primário, passando-se sucessivamente para os furos secundários, terciários, etc., como descrito no item 3.2.2.

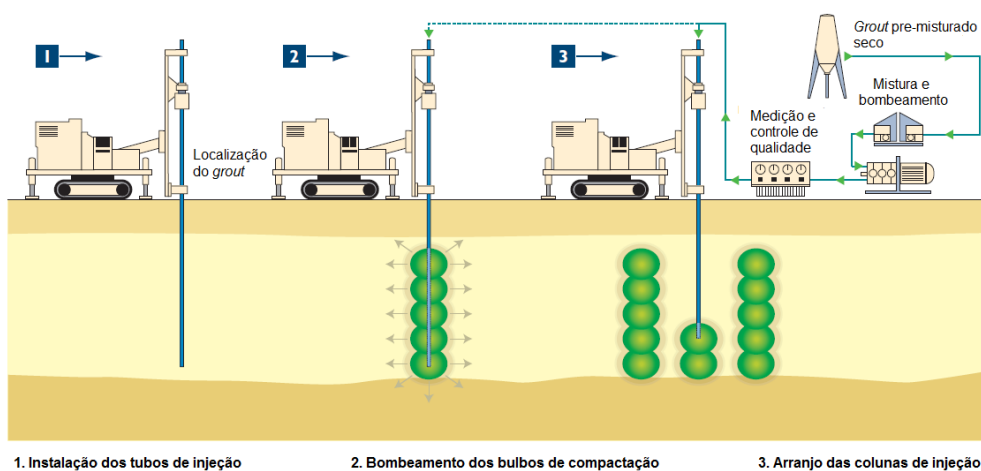


Figura 3.4 - Esquema do processo de execução dos bulbos de compactação (Grupo KELLER).

Fase 3 – Análise dos resultados

Finalizada a execução do tratamento, procede-se à execução de uma nova bateria de ensaios para a verificação da eficiência dos bulbos de compactação, sendo os ensaios SPT e CPT os mais empregados para o controle da resistência do solo e o pressiométrico para o controle da compressibilidade (aumento da tensão horizontal). A eficiência do processo pode ser afetada pelos seguintes fatores:

- não homogeneidade do solo, afetando a forma da massa de argamassa injetada, incluindo existência de fissuras ou presença de estruturas subterrâneas nas proximidades;
- estado de tensões existente no solo em campo;
- características de compressibilidade, resistência e permeabilidade do maciço de solo.

Com base nestas informações é possível estimar os parâmetros de injeção, como a pressão e taxa de injeção e o volume de argamassa necessário para atingir a densificação desejada. A precisão destas estimativas está diretamente relacionada com a qualidade da obtenção das propriedades geotécnicas do solo.

Por este motivo, geralmente os parâmetros de injeção não são muito bem conhecidos *a priori*, sendo ajustados à medida que algumas colunas de bulbos de argamassa são realizadas. Além disso, estes valores podem variar em diferentes áreas do mesmo sítio.

3.2.1. Métodos de injeção

Durante a etapa de injeção, a argamassa é bombeada através de mangueiras de alta pressão ou uma combinação de mangueiras e tubos de aço (geralmente de 50 mm de diâmetro, ainda que diâmetros de 40 a 75 mm sejam ocasionalmente utilizados).

O bombeamento é realizado em etapas. Dependendo das especificações de projeto e das propriedades do solo, a distância entre fases de injeção pode variar entre 0,90 m a 2,40 m, porém nunca excedendo a 3,0 m (Warner e Brown, 1974). Segundo a ASCE (2010), a distância entre fases de injeção está tipicamente na faixa de 0,30 m a 0,60m, com distâncias de até 1,80 m sido reportadas na execução de bulbos a grandes profundidades.

Dois métodos de injeção são usados: o descendente (*top-down*) e o ascendente (*bottom-up*).

No método descendente a injeção é executada a partir do topo da camada tratada. Em cada uma das fases de injeção se deixa endurecer a argamassa e posteriormente a perfuração é reiniciada para dar continuidade ao processo de injeção. No método ascendente a injeção é executada em sentido inverso, iniciando da zona mais profunda da camada em direção à superfície do terreno (Figura 3.5).

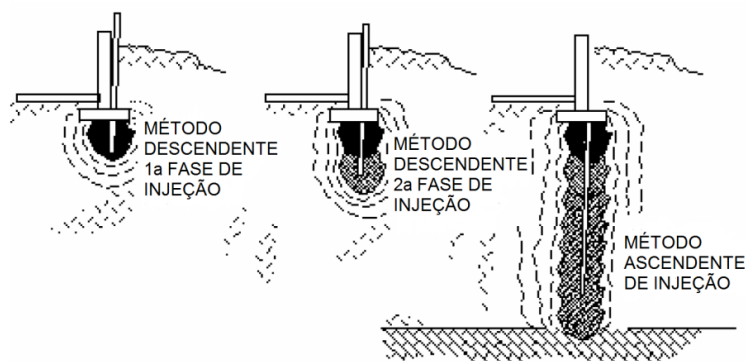


Figura 3.5 - Método de injeção descendente na 1^{ra} e 2^{da} etapa de injeção (duas primeiras figuras) e método de injeção ascendente na última etapa (Henriquez, 2007).

Quando se aplica o método descendente, a injeção das fases superiores provoca um confinamento da camada que limita o levantamento da superfície do terreno. Este método é mais utilizado para aplicações de pouca profundidade, porém o processo é mais lento e de maior custo por necessitar de maiores quantidades de argamassa.

Em contrapartida, quando se aplica o método ascendente, as fases de injeção se realizam de forma contínua e acumulativa até a superfície do terreno provocando o levantamento do maciço de solo. Este método pode ser de difícil controle em zonas superficiais (ruptura por levantamento), mas é o mais frequentemente utilizado por ser mais econômico, de menor custo e de mais rápida execução.

3.2.2. Padrão de malhas

A distância de separação e configuração (malha) dos furos de injeção depende das condições específicas do local, especialmente se existirem edificações ou construções subterrâneas.

Em geral, os furos de injeção se dispõem segundo malhas triangulares ou quadradas, com separação equidistante entre si, nunca superior a 3,5m. A densificação do solo decorrente da injeção é otimizada pela aplicação do método conhecido como “*split spacing*”, na qual os furos são injetados de forma alternada, buscando que os furos injetados inicialmente proporcionem maior confinamento aos furos injetados posteriormente. A sequência dos trabalhos se inicia pela linha de injeção denominada primária, passando-se sucessivamente à injeção nas regiões formadas entre as linhas primárias, denominadas secundárias. Adicionalmente, se necessário, podem ser usadas linhas de injeção terciárias ou de maior ordem.

Warner e Brown (1973) constataram que para injeções destinadas à correção do recalque de estruturas a separação entre linhas de injeção de 3,0m a 3,5m mostrou-se adequada para taxas de injeção da ordem de 42 l/min. Para taxas de 56 l/min reduziram a distância para 2,4m, observando que a taxa de injeção mais elevada induziu um comportamento não drenado do solo natural, resultando numa

menor densificação que exigiu uma maior numero de linhas de injeção com menor espaçamento entre elas.

Graf (1992) indicou que a separação entre linhas de injeção também depende da profundidade dos bulbos. Em injeções de argamassa a profundidades maiores do que 3,6m frequentemente se usam espaçamentos de 2,4m a 4,8m, enquanto que para injeções superficiais (menores do que 3m) o espaçamento usualmente varia entre 1,2m a 3m.

A ASCE (2010) reportou que o diâmetro da massa de argamassa é dependente da densidade inicial do solo, do nível de melhoramento desejado e da taxa de injeção. Recomenda uma separação entre cada linha de injeção na ordem de três a seis vezes o diâmetro da massa de argamassa prevista para o processo.

A Figura 3.6 mostra a malha de linhas de injeção em um projeto documentado por El-Kelesh e Matsui (2002). As colunas de bulbos de argamassa foram distribuídas seguindo um padrão de malha triangular e com um espaçamento equidistante de 1,7m, considerando um critério limite de volume de argamassa de $0,14 \text{ m}^3$ por estágio de injeção (equivalente a um diâmetro uniforme de 0,70m). De acordo com a figura, foram executadas sete séries de injeção em campo, identificadas como L-1 a L-7, abrangendo diferentes linhas de injeção. Cada série contém uma sequência de injeção, indicada pela numeração das linhas de injeção. A sequência de injeção foi realizada em duas etapas, com as linhas de injeção primárias seguidas das secundárias. Na Figura 3.6, os furos P-7, P-8 e P-9 formam as linhas primárias da série L-2, enquanto que os furos P-10, P-11 e P-12 formam as linhas secundárias desta mesma série.

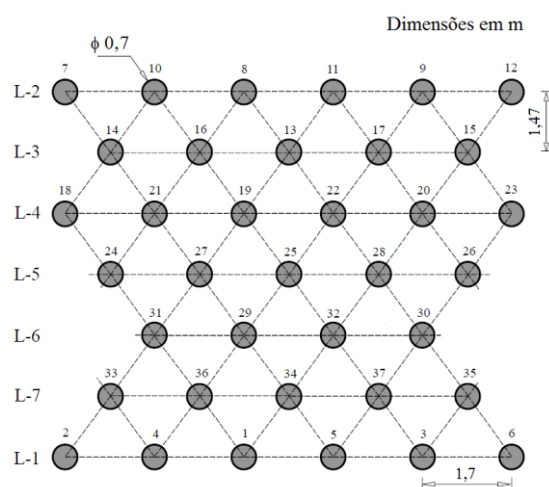


Figura 3.6 - Separação e distribuição das linhas de injeção (El-Kelesh e Matsui, 2002).

3.2.3. Tecnologia da argamassa

A argamassa usada no processo de injeção consiste em mistura de areia siltosa, cimento e água, formando uma argamassa com consistência (*slump*) menor do que 2" (50 mm).

Pequenas proporções de argila altamente plástica tais como bentonita ou aditivos de concreto, podem causar que a argamassa se comporte como um fluido que, apesar de apresentar melhor característica para bombeamento, pode ser prejudicial para o processo de injeção, pois limita o objetivo que é a formação de bulbos. Por outro lado, se a mistura de argamassa apresentar consistência excessiva, podem ser desenvolvidas grandes forças de atrito que restringem o seu transporte e eventualmente possam obstruir mangueiras e tubos. Segundo a ASCE (2010) a argamassa deve apresentar as seguintes características:

1. deve ser suficientemente bombeável para que seja possível sua injeção através das mangueiras;
2. deve propiciar a formação de bulbos no interior do subsolo;
3. não deve ser capaz de expulsar água sob pressão após sua injeção, o que é função das propriedades reológicas dos componentes da mistura utilizada.

Estas três considerações são controladas pelas propriedades das partículas finas, menores do que 0,074 mm (malha 200), a quantidade da água na mistura e a distribuição granulométrica dos agregados presentes.

A mistura deve apresentar agregados bem graduados (Figura 3.7) que contenham distintos tamanhos de partículas, varia de argila a pedregulho, com a finalidade de obter uma mistura suficientemente compacta para evitar a possibilidade de ocorrência do faturamento hidráulico, situação possível quando a argamassa puder escoar através dos poros do solo circundante.

As melhores misturas são aquelas que estão no limite das não bombeáveis, limitando o teor de finos até atingir esta situação, e corrigindo-as em seguida pela adição de pequenas quantidades de siltes, cinzas ou bentonita com o objetivo de tornar a mistura suficientemente bombeável.

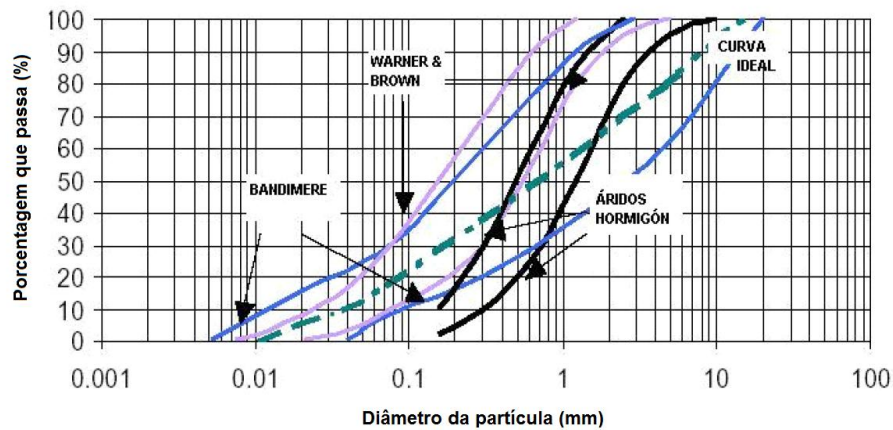


Figura 3.7 - Distribuições granulométricas para os agregados da argamassa.

3.2.4. Estimativa da quantidade de argamassa

A estimativa da quantidade de argamassa é um aspecto complexo nos projetos de melhoramento de solos por bulbos de compactação, subestimado com frequência pelos engenheiros. Esta quantidade pode ser calculada mais acertadamente utilizando uma taxa de injeção que somente pode ser prevista se forem disponíveis informações suficientes sobre a condição do solo, a consistência da argamassa e o método de injeção. Adicionalmente, exige-se do engenheiro um papel ativo no controle da qualidade e na verificação da quantidade de argamassa durante o processo de injeção.

Brown e Warner (1973) indicaram que a pressão de bombeamento é controlada pelo ajuste da taxa de injeção, adotando-se inicialmente taxas próximas de 30 l/min, que podem ser aumentadas se a pressão de bombeamento ficar estável. No entanto, se esta incrementar rapidamente, a taxa deve ser reduzida. A taxa de injeção comumente utilizada, segundo aqueles autores, situa-se entre 10 e 50 l/min.

A ASCE (2010) indica que em sendo os bulbos de compactação uma técnica de deformação controlada, então a taxa e o volume de injeção devem também ser controlados, com as pressões medidas para determinar a resistência do solo quando a injeção for aplicada. Indica também que a taxa de injeção de argamassa está tipicamente entre 30 a 60 l/min, e que taxas menores podem ser necessárias. Taxas de injeção superiores a 60 l/min podem ser eventualmente usadas desde que o processo de injeção não fique fora de controle.

Um método simples para o cálculo aproximado da quantidade de argamassa para atingir a densificação desejada, a partir da redução do volume do solo após injeção de argamassa, é sugerido pela ASCE (2010). Por exemplo, considerando-se os elementos da Figura 3.8 (onde se mostra a planta e o perfil do projeto), deseja-se obter um peso específico final de 16 kN/m^3 para toda a espessura da camada 2, sobrejacente a uma camada mais rígida e antes da construção de uma futura edificação. Um projeto de melhoramento do solo por bulbos de compactação será realizado a partir dos 3m dos contornos da edificação.

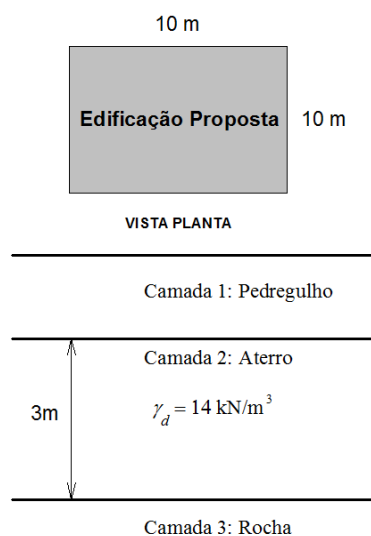


Figura 3.8 - (a) Planta da futura edificação; (b) Perfil geotécnico do depósito de solo mostrando a camada 2 a ser densificada (ASCE, 2010).

Para incrementar a peso específico seco natural de 14 kN/m^3 para 16 kN/m^3 se requer um aumento relativo de 14,3%. Considerando que a massa de solo se mantém constante e que esta é igual à massa específica vezes o volume de solo considerado, conclui-se facilmente que este incremento de peso específico corresponde a uma redução do volume de solo de 12,5%.

Esta redução de volume corresponde à quantidade de argamassa necessário, multiplicando-se o volume do solo a ser melhorado ($16 \text{ m} \times 16 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 768 \text{ m}^3$) por 12,5% (percentual de redução de volume) resultando numa quantidade de argamassa equivalente a 96 m^3 para atingir a densificação desejada. Tipicamente, esta quantidade pode ser injetada em linhas verticais espaçadas entre 2m a 4 m. Admitindo um espaçamento de 2,5 m, este processo então requer aproximadamente 41 linhas de injeção com taxa média de $0,78 \text{ m}^3$ de argamassa por metro linear de injeção.

Cabe aqui mencionar que o volume de argamassa injetada no subsolo pode penetrar nos vazios do solo, o que não é o objetivo, e conseqüentemente a densificação na zona próxima ao ponto de injeção não ocorrerá. É indispensável, portanto, que o engenheiro tenha conhecimento das condições do solo em campo.

3.2.5. Pressão de injeção

Assim como a taxa de injeção, a pressão de injeção durante o processo pode variar amplamente, sendo verificada com ajuda de um manômetro. Alguns dos fatores mais importantes que afetam a pressão são a taxa de injeção, a consistência e quantidade de argamassa, a profundidade de injeção e as propriedades do solo em tratamento.

Graf (1992) relacionou a taxa com a pressão de injeção. Uma taxa de injeção de 20 l/min ou inferior é utilizada para pressões de injeção de 2750 kPa a 3500 kPa, quando a injeção se efetuar a profundidades entre 6 e 9m, dependendo também das condições do solo.

Segundo Warner e Brown (1974), a pressão máxima pode ser medida durante o bombeamento, como uma contrapressão avaliada quando o bombeamento for interrompido ou quando se aplicar uma taxa de injeção muito baixa. Esta contrapressão é uma função da resistência passiva do solo contra a intrusão de argamassa, sendo mais significativa do que a pressão observada durante o bombeamento e que depende da taxa de injeção aplicada. As pressões observadas por aqueles autores variaram entre 350 kPa a 1700 kPa para injeções realizadas entre 1,5m a 1,8 m da superfície do terreno, respectivamente. Pressões de 3500 kPa , ou superiores, podem ser empregadas para profundidades maiores do que 6,1 m, embora não devam exceder a 4200 kPa independentemente da profundidade considerada. De modo geral a pressão de injeção varia com a profundidade, sendo delimitada pelo intervalo de 350 kPa a 4000 kPa.

Quando se efetua o processo de injeção a grandes profundidades, o nível de resistência passiva do solo é muito maior do que nas zonas próximas à superfície, devido ao elevado estado de tensões. Assim, em zonas profundas o bombeamento pode ser realizado sob altas pressões de injeção, acompanhado de um elevado volume de argamassa injetado no solo, sem provocar levantamentos na superfície

do terreno. Por outro lado, à medida que a injeção se aproxima da superfície, uma baixa pressão de injeção e um menor volume de argamassa são necessários, pois deslocamentos verticais na superfície do terreno tendem a evitar a densificação do solo naquelas profundidades.

A Tabela 3.1 é uma compilação de valores de pressões e taxas de injeção reportadas por alguns pesquisadores que utilizaram bulbos de compactação como técnica de melhoramento de solos.

Tabela 3.1 - Valores limites de pressão de injeção em solos granulares.

Autor	Espaçamento entre linhas de injeção (S)	Pressão aplicada por ponto de injeção	Volume de argamassa por ponto de injeção (m ³ /etapa)/Taxa de injeção	Levantamento observado na superfície do terreno
Graf(1969, 1992)	Profundidades maiores a 3,6m: S= 2,4m-4,8m. Profundidades superficiais menores a 3m: S= 1,2m-3m.	Pressões de 2750 kPa - 3500 kPa para profundidades de 6m a 9m.	Profundidades superficiais até 3m: 0,056 m ³ /min. Profundidades maiores a 4,5m: 0,085 m ³ /min. Profundidades de 6 a 9m (relacionadas com pressões de injeção de 2750-3500 kPa): 0,020 m ³ /min.	Até 500mm. de levantamento de estruturas e entre 1,5mm a várias polegadas de levantamento de piers e pilares de suporte de fundações.
Brown&Warner (1973)	Taxa de injeção de 0,042m ³ /min: S=3- 3,5m. Taxa de injeção de 0,056m ³ /min: S=2,4m.	Pressões de 340 kPa - 3400 kPa	Taxa de injeção média: 0,030 m ³ /min. Vol. de 0,060-11 m ³ de injeção por etapa de injeção entre 1,2m-1,8m.	O processo de injeção continua até ocorrência de alteração na superfície do terreno.
Warner&Brown (1974)	S=1,52m - 4,60m	Pressões de 350 kPa -1700 kPa em profundidades de 1,5m-1,8m, e de até 3500kPa ou mais em profundidades maiores a 6,1m	Taxa de injeção média: 0,030 m ³ /min. Taxa de injeção de 0,003-0,014 m ³ /min para argilas em condição não drenada para evitar "fraturamento hidráulico".	A pressão será limitada até ocorrência de levantamento na superfície do terreno.
El-Kelesh&Matsui (2002)	S=1,70m	Pressões máximas de até 8000 kPa.	Vol. de 0,14m ³ por 0,70m de injeção	
Wu (2005)		Pressões máximas de até 4500 kPa.	Vol. de 0,14m ³ por 0,30m de injeção	6mm de movimento estrutural ou 13mm de levantamento na superfície do terreno

3.2.6. Critério de interrupção

Como mencionado anteriormente, taxas de injeção estão inter-relacionadas com a pressão de injeção, o que implica que maiores pressões de injeção podem ser aplicadas em grandes profundidades (Graf, 1969, 1992).

Segundo as experiências de Graf (1969, 1992), os seguintes critérios para uma decisão de interrupção da injeção podem ser considerados:

- (1) até que uma determinada pressão limite ou uma quantidade máxima de argamassa estabelecida para cada fase de injeção tenha sido atingida; ou
- (2) até observar uma queda da pressão pico quando se estiver bombeando sob taxa de injeção constante, frequentemente entre 350 kPa a 500 kPa, indicando que a resistência ao cisalhamento do solo esta sendo excedida; ou
- (3) até que um levantamento na superfície do terreno seja observado devido à proximidade das injeções junto à superfície; ou
- (4) por julgamento do próprio engenheiro, desde que experiente neste tipo de aplicação.

Warner e Brown (1974) também mencionam que a pressão máxima de injeção está limitada pela pressão de quebra das partículas do solo. Se os grãos forem ásperos e rugosos, esta quebra poderá ocorrer a baixas pressões de injeção. Adicionalmente, a pressão está limitada quando a injeção for executada próximo a taludes ou de muros de contenção.

As conclusões de Brown e Warner (1973) são praticamente as mesmas de Graf (1969), indicando que a pressão de injeção poderá continuar até que alguma alteração na superfície do terreno seja observada.

3.2.7. Limitações dos bulbos de compactação

Algumas desvantagens ou limitações podem ser esperadas em trabalhos de compactação de solos com esta técnica. A maioria destas limitações está relacionada com o confinamento ou requerimentos especiais de localização, movimentos de estruturas vizinhas e taxa de injeção de argamassa. É importante destacar (Brown e Warner, 1973, ASCE, 2010):

- (1) a relativa ineficiência do processo em zonas superficiais de solo;
- (2) a técnica pode ser ineficiente em taludes sem reforços devido à falta de confinamento lateral, podendo ser possível densificar o solo a profundidades de 3 m (10 ft) medidos abaixo da superfície do talude;
- (3) dificuldade em avaliar resultados do processo;
- (4) não é adequado para materiais em decomposição, tais como solos com elevado teor orgânico ou em depósitos de lixo;
- (5) eficiência muito questionada em argilas saturadas devido à dissipação de excessos de poropressão gerados pela injeção;
- (6) a não homogeneidade e anisotropia do subsolo influenciam na forma da argamassa quando é injetado no subsolo;
- (7) a influência da densificação do solo em estruturas sobrejacentes ou adjacentes, podendo causar deslocamentos ou mesmo o colapso das mesmas em decorrência dos efeitos do processo de injeção.