

Índice

- 1 Definição
- 2 Descrição básica do trabalho
- 3 Materiais para Injeção
- 4 Equipamentos
- 5 Traço e preparo de caldas
- 6 Equipe de trabalho
- 7 Tratamento do solo
- 8 Avaliação
- 9 Modelo de boletim de execução

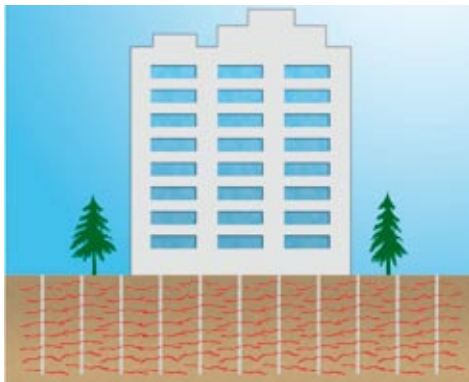
1 Definição

O tratamento de solos e rochas por injeção, objetiva promover melhorias para situações especiais da engenharia civil, tais como:

A) aumentar a impermeabilidade (fig. 1)



B) melhorar capacidade de carga (fig.2)



C) melhorar as condições de estabilidade (fig. 3)



O tratamento é feito pela injeção no maciço de um determinado volume de material a uma determinada pressão. Este material pode ocupar os vazios existentes, romper o maciço e nele se alojar, provocando o adensamento das camadas adjacentes, ou se impregnar em seus vazios.

O material injetado pode ser: calda de cimento; argamassa; solo-cimento ou compostos químicos. Usualmente, são injetadas caldas de cimento. Neste texto, para contemplar todas as possibilidades, usamos a expressão material injetado.

O procedimento básico para se executar os trabalhos envolve os seguintes passos:

A) Execução de um furo com diâmetro mínimo de 3", que atravessa a camada a ser tratada. (figura 4)



Figura 4

B) Colocação de um tubo de PVC rígido com diâmetro interno entre 1" e 1½", devidamente preparado com válvulas-manchete, com espaçamentos entre 30 e 100 cm. Injeta-se o material até



Figura 5

o preenchimento total do espaço anelar entre o tubo de PVC e o furo (bainha). (Figura 5)

C) Com auxílio de um obturador duplo, a partir da válvula-manchete inferior, executa-se a injeção, que irá promover o rompimento da bainha e a introdução de um volume pré-determinado de material no solo, em tantas fases quantas forem necessárias (figura 6).

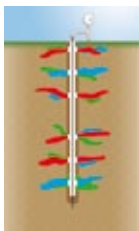


Figura 6

2 Descrição básica do trabalho

Os furos são dispostos em planta, segundo distribuição geométrica que procura minimizar as interferências com obstáculos existentes, bem como abranger as áreas a serem tratadas. Para cada local são definidas algumas etapas de injeção nos furos. Em geral, a abrangência inicial da área a ser tratada é grande, e vai sendo reduzida em função dos resultados de pressão e volume obtidos nos furos iniciais.

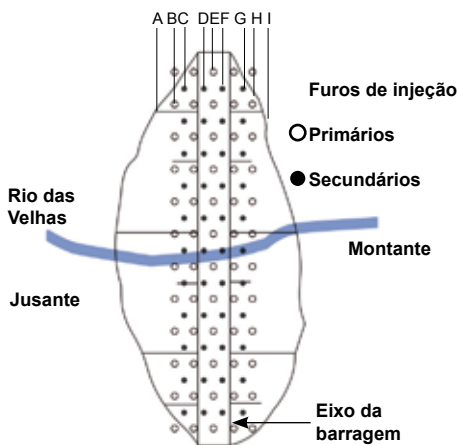


Figura 7 - Tratamento de fundação de barragem

Para minimizar custos, devem ser utilizados os menores diâmetros dos furos e do tubo de PVC, o que garante uma espessura mínima de bainha. Usualmente, a tubulação de injeção tem diâmetro de 1/2" ou de 3/4".

A injeção em um determinado furo é feita depois que o material injetado na bainha alcança resistência mínima, que impeça seu retorno à superfície e, conseqüentemente, o tratamento do solo adjacente. O tempo de espera para pega e endurecimento da bainha é de até 24 horas.

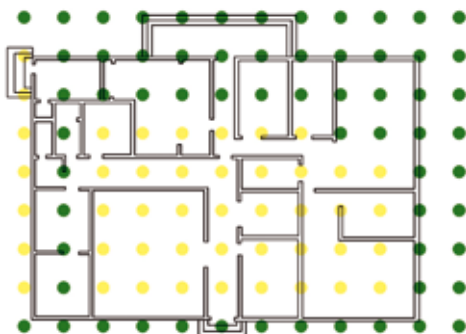


Figura 8 - Tratamento de fundação de edifício

Os furos sofrem injeções em etapas, de acordo com a seguinte sistemática:

- O "Obturador Duplo" deve ser posicionado no nível desejado, para isolar as manchetes localizadas nos níveis superiores e inferiores.

A figura 9 mostra a situação de um tubo com válvulas-manchete. No caso de rochas, pode-se utilizar obturador expansível, isolando cada trecho a ser tratado.

- O material deve ser injetado com pressão suficiente para romper a bainha.
- Durante a injeção do material, a pressão deve ser a necessária para permitir o fluxo do material com o volume especificado.
- Após a injeção de um certo volume de material (usualmente entre 20 e 100 litros), o processo deve ser interrompido,

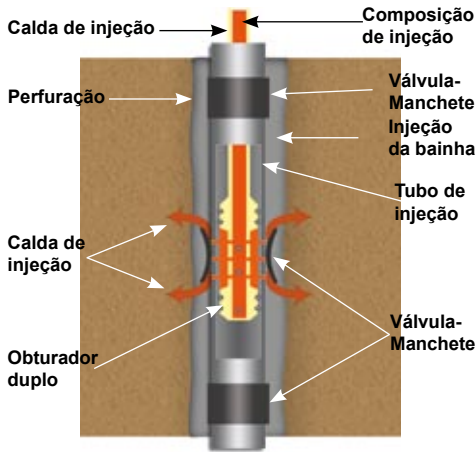


Figura 9 - Obturador duplo

anotando-se para esta válvula os valores da pressão de abertura e da injeção.

- O obturador, então, é posicionado no nível superior seguinte, e o ciclo para a injeção é repetido neste nível.

Os detalhes do projeto em relação a materiais, equipamentos, composição do material, pressões e vazões de injeção, e controle de qualidade dos serviços, estão definidos a seguir.

3 Materiais para injeção

Os materiais comumente usados, tanto para injeção no solo quanto na bainha, são constituídos de cimento, solo e água.

Eventualmente, para melhorar suas características de estabilidade e injeção, adiciona-se bentonita ao material. Em geral, os materiais que compõem as caldas seguem requisitos e exigências técnicas, conforme segue.

3.1 Água

Deve apresentar-se visualmente limpa e isenta de quantidades prejudiciais de impurezas como óleo, ácido, álcalis, sais e matéria orgânica ou qualquer outra substância que interfira com as reações de

hidratação dos sólidos da calda.

3.2 Cimento

O cimento deve ser do tipo Portland, apresentar espessura "Blaine" não inferior a 3.200 cm²/g. Os locais de armazenamento devem estar secos e ventilados, para retardar a hidratação. É desaconselhável o empilhamento de mais de 10 sacos, e estas pilhas devem estar apoiadas sobre tablado de madeira, para o cimento não ficar em contato direto com o piso.

Cimento já em início de processo de hidratação não pode ser empregado em injeções.

3.3 Argila

Devem ser utilizados solos argilosos com teor de areia inferior a 20% e sem presença de matéria orgânica, que tenham Limite de Liquidez (LL) mínimo de 50 e Limite de Plasticidade (LP) mínimo de 20. Materiais naturais com estas características são facilmente encontráveis.

Podem ser usados também materiais argilosos próprios para fabricação de telhas ou tijolos cerâmicos. Porém, estes materiais, além de serem mais caros, exigem maior tempo de hidratação, pois estas argilas são muito ativas. Antes de sua utilização, eles devem ser previamente misturados com água e hidratados por um período aproximado de 4 horas.

4 Equipamentos

4.1 Perfuração

O método escolhido determina os equipamentos de perfuração a serem mobilizados. Os furos podem ser executados a trado, ou por equipamento rotopercussivo ou rotativo. Na execução do furo pode ser necessário o uso de revestimento.

Os equipamentos devem estar em

INJEÇÃO DE CONSOLIDAÇÃO

perfeito estado de funcionamento, propiciando a execução do furo dentro das especificações e condições impostas pelas limitações das edificações existentes.

Em alguns locais, para se executar o furo é necessário atravessar lajes de pisos de edificações. Quando isso ocorre, é preciso usar ou ferramentas diamantadas ou vídeas.

Na presença de rochas ou material rochoso, pode-se usar ou equipamento rotopercussivo, que destrói o material escavado, ou rotativo, que o recupera.

4.2 Injeção

Os equipamentos de injeção devem compor um circuito, conforme segue:

A) Demolidor de argila.

B) Tanque de hidratação e homogeneização de argila provido de pás, que movimentam a lama constantemente. Pode-se optar pelo uso de tanques interligados, com menor capacidade, que sejam providos de bomba para fazer a lama circular entre eles.

C) Misturador de alta turbulência provido de turbina, com rotação mínima de 1.700 rpm, na sua parte inferior. Capaz de preparar calda de cimento, solo-cimento, em quantidade suficiente para suprir a bomba injetora e fornecer a homogeneidade adequada à mistura.

D) Agitador de calda com capacidade igual à do misturador, capaz de manter a calda em agitação. Entre o misturador e o agitador é instalada peneira, com 2 mm

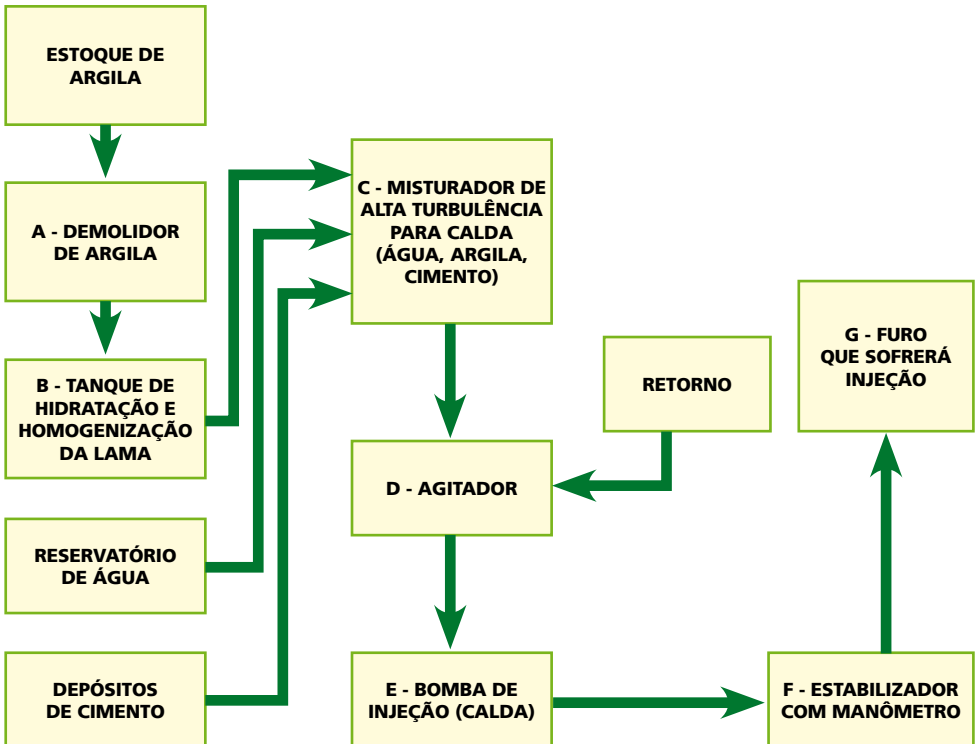


Figura 10 - Fluxograma de injeções

de abertura, que deve ser facilmente removível para as constantes limpezas.

E) Bomba de pistão triplex das marcas Royal Bean, Boyles, Clivio, Sondap ou similar, com capacidade de injetar vazões de 50 litros/minuto com pressões de 50 Kg/cm² em furos que estejam distantes pelo menos 50 metros da central de injeção.

F) Estabilizador de pressão capaz de reduzir oscilações manométricas. Devem ser instalados nos circuitos tantos equipamentos quantos forem necessários, até se alcançar a estabilidade. Manômetro de 4", provido de dispositivo salva-manômetro, com capacidade entre 10 e 100 Kg/cm².

G) Obturador duplo com diâmetros de 1" a 1½", com espaçamento da vedação em torno de 0,5 metro, do tipo expansivo ou fixo, em quantidade suficiente para a injeção em vários furos simultaneamente.

No esquema proposto, e alternativamente, é possível substituir o demolidor de argila (A) e o tanque de hidratação (B) por um único equipamento, que promova a mistura e a hidratação da argila com água. Trata-se de um misturador de alta turbulência, similar ao usado na mistura final da calda.

5 Traço e preparo das caldas

5.1 Traço

Usualmente, se prevê a utilização de dois traços básicos de calda de solo, água e cimento: um para injeção no solo a ser tratado e outro para preencher a bainha.

A resistência do material é regida, principalmente, pelo fator água/cimento (peso da água/peso do cimento). Para compor as caldas são adotados os seguintes valores para peso específico dos grãos sólidos: cimento $\gamma_c = 3,1$ Kg/litro, solo $\gamma_s = 2,7$ Kg/litro.

Para o preparo de 1 m³ de calda são necessárias as seguintes quantidades de componentes, segundo a fórmula:

$$\text{litros de calda} = Pc/\gamma_c + Ps/\gamma_s + Pa/\gamma_a = Pc/3,1 + Ps/2,7 + Pa/1,0$$

onde: Pc = Peso de cimento (Kg); Ps = Peso de solo seco (Kg); Pa = peso de água (Kg).

Na tabela a seguir estão exemplos de dois traços usuais de solo-cimento. Os traços pré-definidos são ajustados durante a fase dos ensaios iniciais, tendo-se em conta, principalmente, as características da argila a ser usada e visando a padronização com as seguintes características:

- Fator de sedimentação até 5%
- Tempo de escoamento

| TIPO DO FUNIL | TEMPO (segundos) | |
|-------------------------------|------------------|---------|
| Marsh \varnothing 5,0 mm | 36 a 40 | |
| Mecdsol \varnothing 10 mm | 9 a 14 | |
| MATERIAL | TRAÇO 1 | TRAÇO 2 |
| Cimento (Kg) | 100 | 160 |
| Solo (Kg) | 340 | 340 |
| Água (l) | 840 | 820 |
| Densidade da calda (Kg/litro) | 1,28 | 1,32 |

Figura 11 - Traços usuais de solo-cimento

Durante os trabalhos, os materiais devem ser controlados a partir das seguintes medidas previamente obtidas em laboratório: densidade, fator de sedimentação e tempo de escoamento.

A densidade define o traço. O fator de sedimentação define a estabilidade. O tempo de escoamento define a fluidez (capacidade de injeção). O controle do traço se faz pela medida da densidade da mistura: solo + água, e da mistura final: cimento + água + solo.

5.2 Preparo das caldas

As caldas são preparadas pela agitação turbulenta da argila hidratada com cimento e água, até que seja alcançada a perfeita homogeneização desta mistura. Na dosagem dos traços devem ser consideradas as quantidades de água empregadas para a hidratação da argila.

Antes do início dos trabalhos de injeção e após a definição do tipo de argila a ser usada no tratamento, devem ser feitos uma série de ensaios com várias misturas, até se alcançar a definição do traço a ser usado. Quando há necessidade de injeção rápida das fases, a bainha é composta por traço rico em cimento, usualmente, calda com fator $a/c = 0,5$ (em peso).

6 Equipe de trabalho

6.1 Encarregado geral de serviços

a) Verifica: condições para entrada e movimentação de equipamentos no canteiro da obra; descarregamento de equipamentos, utensílios e ferramentas; instalação da central de injeção e implantação geral da obra.

b) Verifica programação de execução (sequência executiva) de acordo com características da obra e necessidades do cliente.

c) Coordena o DDS (diálogo diário de segurança) antes do início das atividades de cada dia e instrui em relação à segurança durante a execução dos serviços.

d) Coordena locação, verticalidade e instalação do equipamento de perfuração, misturador e bomba de injeção de solo-cimento.

e) Orienta em relação aos procedimentos de perfuração, instalação do tubo de injeção e inspeção.

6.2 Operador de perfuratriz

a) Movimenta o equipamento de acordo com a sequência executiva.

b) Instala o equipamento no furo, observando locação e inclinação.

c) Verifica quantidade e tamanho dos tubos de revestimento colocados, para que acompanhem a profundidade dos furos.

d) Detecta mudanças de camadas do solo à medida que a perfuração avança.

e) Detecta eventuais perdas d'água durante a perfuração.

f) Elabora registro dos dados de perfuração para inclusão no boletim.

g) Orienta auxiliares de perfuração quanto à utilização do ferramental necessário.

h) Instala o tubo de injeção no furo.

6.3 Injetador

a) Prepara o material a ser injetado.

b) Coordena a injeção, tanto no posicionamento do obturador quanto na injeção, de forma a atender as condições do projeto e a lavagem (pós-injeção) do tubo com válvulas-manchete.

c) Lança nos boletins os valores de pressão e volume injetados.

6.4 Auxiliar geral

Auxilia os especialistas nas atividades principais.

Obs: Devido à não simultaneidade das tarefas, um mesmo funcionário pode exercer várias funções, desde que esteja qualificado.

7 O tratamento do solo

7.1 Injeção na bainha

Após a instalação do tubo de PVC, é feita a injeção na bainha, ou seja, o

preenchimento do espaço anelar entre o tubo de PVC e o furo. Esta atividade é executada com a injeção na válvula-manchete inferior.

Este trabalho é feito de forma lenta e será considerado concluído quando a calda aparecer na boca do furo. Após a injeção da bainha, o tubo de PVC é lavado pela circulação de água.

Nos casos em que existe piso, se for constatado que a calda está penetrando entre o piso e o aterro, a injeção da bainha deve prosseguir até que o vazio sob o piso seja preenchido. Alternativamente, é possível preencher o furo e, a seguir, introduzir o tubo de PVC.

Se houver consumo excessivo de calda durante a injeção na bainha, é sinal que o tubo atravessou uma cavidade, tubulações, caixas etc. Neste caso, os trabalhos devem ser interrompidos, para se verificar o que houve.

Para que ocorra a injeção no solo, a bainha precisa ter uma resistência mínima, assim a calda injetada promove o rompimento localizado, o que possibilita sua penetração no interior do maciço, sem que ele escoe ao contato da bainha com o solo circundante ou pelo contato da bainha com o tubo.

Por outro lado, uma bainha excessivamente resistente exige altas pressões para o seu rompimento e para abertura da válvula. A bainha mais adequada depende da sua espessura, do traço da calda e do tempo de pega e endurecimento da calda. O traço da calda e o tempo de rompimento da bainha são ajustados no campo.

7.2 Injeção no solo

As injeções são executadas numa única fase ou em várias fases.

Para se evitar a injeção de material a grandes distâncias, ou ainda se minimizar

riscos de fraturas nos pisos das edificações, o volume a ser injetado por manchete deve ser, inicialmente, limitado.

A sistemática adotada na injeção consiste em se impor um volume constante de injeção de material, verificando o comportamento das pressões de resposta do solo.

Em função das pressões observadas, são tomadas decisões de se prosseguir ou se interromper as injeções.

Nos critérios de interrupção das injeções, são levadas em conta as observações relativas ao surgimento de material injetado na superfície ou eventuais riscos de comprometimento das estruturas vizinhas.

Volumes e pressões de injeção inicialmente especificados são ajustados durante a execução dos serviços.

7.3 Abertura da válvula-manchete

Após a injeção na bainha, são iniciadas as injeções individuais em cada válvula-manchete, usualmente de baixo para cima. O primeiro passo é a aplicação de pressões crescentes até a abertura da válvula-manchete, percebida pela queda brusca da pressão registrada no manômetro e pela imediata absorção do material. Caso não se consiga abrir a manchete com o material injetado, sua abertura pode ser provocada pela injeção de água.

A pressão máxima utilizada para proporcionar a abertura da válvula-manchete deve ser registrada em boletim próprio.

7.4 Pressão de Injeção

As pressões de injeção são determinadas pelo estado de confinamento do solo.

Num processo de injeção com vazão constante ocorre, na maioria das vezes, um

INJEÇÃO DE CONSOLIDAÇÃO

comportamento de pressões semelhantes ao mostrado no gráfico abaixo, figuras 12 e 13, de onde pode ser ressaltado:

- Após abertura da manchete e rompimento da bainha (Pa), observa-se uma queda brusca da pressão (Pi), caracterizando o início da injeção no solo.
- À medida que a injeção prossegue, novos trechos do solo podem ser rompidos e preenchidos com material injetado, acarretando em aumento lento e progressivo da pressão.
- Se, em determinado momento, a pressão de injeção estabiliza ou até diminui, pode ser que o plano de ruptura tenha interceptado um vazio, que está sendo preenchido com calda. Após esta cavidade ser preenchida, a pressão provavelmente voltará a subir, caracterizando o seu preenchimento.

Pa Pressão máxima de abertura da manchete
Pi Pressão inicial de injeção
Pf Pressão final de injeção

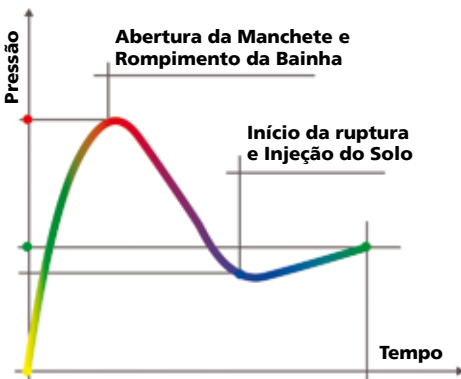


Figura 12 - Comportamento típico das pressões durante a injeção de solo

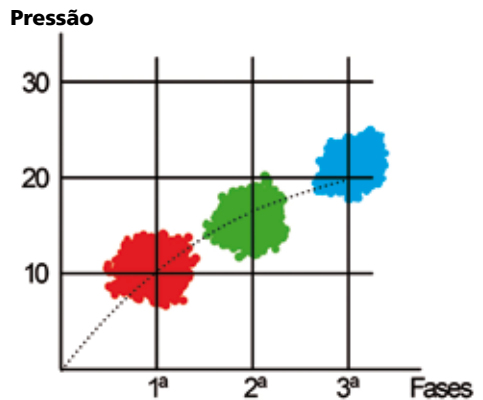
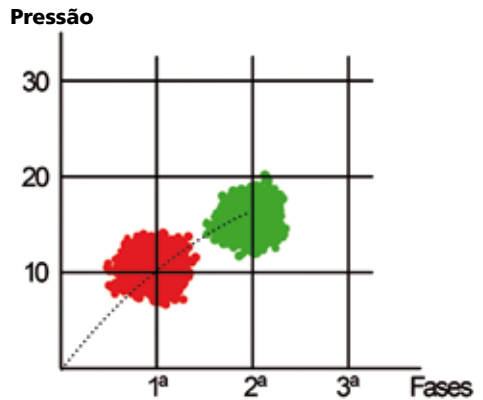
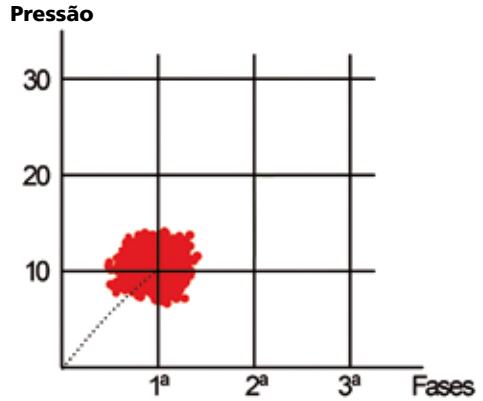


Figura 13 - Comportamento típico das pressões durante a injeção das fases

7.5 Controle de registros

Na fase inicial de definição dos traços dos materiais e durante o processo de execução dos trabalhos de injeção, é re-

alizada uma série de controles, cujo objetivo é o de determinar as características das caldas.

Basicamente, estes controles são: visual (contínuo); densidade (diário) e para cada traço preparado; e tempo de escoamento (diário).

Durante a execução dos furos, todas as informações julgadas de interesse devem ser registradas, tais como: presença de vazios; níveis d'água; perda d'água etc.

Na instalação do tubo, devem ser registrados posicionamento e espaçamento das manchetes, tomando-se como referência o nível da boca do furo, o que permite o correto posicionamento do obturador duplo durante as injeções.

Durante a injeção na bainha devem ser registrados, principalmente, o traço utilizado, volumes e perdas de calda, se houver.

Nas injeções no solo, além dos volumes injetados por manchete, devem ser registradas a pressão de abertura da manchete (Pa) e a pressão final de injeção (Pf).

Para cada furo deve ser elaborado um boletim, contendo todos os dados, desde a furação até a injeção.

7.6 Critérios para interrupção

Os critérios para interromper a injeção são definidos com base nas análises dos dados observados durante os trabalhos, especificamente para cada caso de obra.

7.7 Equipamentos de ensaios do material

Para executar ensaios dos materiais deve-se instalar um pequeno laboratório de campo, equipado com:

- Densímetros com graduação que permitam leitura de variação de densidade de $0,01 \text{ g/cm}^3$.
- Funil Marsh com saída de 5 cm de com-

primento e diâmetro de 5 mm.

7.8 Apresentação do resultado das injeções

Os dados compilados durante o processo do tratamento, podem ser lançados em mapa e interpolados apresentando curvas de isopressão ou isovolume.

Estes mesmos dados podem ser plotados de forma tridimensional, possibilitando o entendimento da evolução do trabalho de injeção.

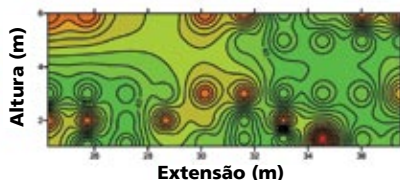


Figura 14 - Isovoluma ou Isopressão

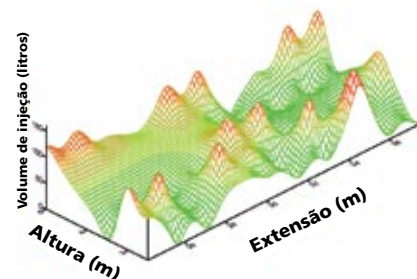


Figura 15 - Disposição tridimensional em volume

8 Avaliação

O tratamento de solos por injeção de consolidação é um método muito eficiente, porém intuitivo e iterativo.

A eficiência depende da intensa interação entre as equipes de projeto e de execução. Ensaios de perda d'água, anteriores e posteriores ao trabalho, bem como medidores de nível d'água, podem aferir o resultado obtido e devem ser obrigatoriamente utilizados.

9 Modelo de boletim de execução


| BOLETIM DE INJEÇÃO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|----------|----|----------------|---------------------------------|--------|----------------|----------|---------------|--|-----|-------|--|-----------------|---------------------|----|----|-------|--|
| NOME DA OBRA | | | | | | | | | |  | | | | | | | | | |
| Nº DA OBRA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Furo Nº | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 DADOS DO FURO | | | | | 2 DADOS DA PERFURAÇÃO | | | | | | | | | | | | | | |
| COMPRIMENTOS | | | | | Material | Compr. | Acumulado | Diâmetro | Início / / | | | | | | | | | | |
| Total | | | | | Solo | | | | | | | | | | | | | | |
| Livre | | | | | Rocha Alt. | | | | Fim / / | | | | | | | | | | |
| Com válvulas | | | | | Rocha Sã | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | Perda D'água | | Revestimento | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | Sim | Não | Sim | Não | | | | | | | | | | | |
| | | | | | () | () | () | () | | | | | | | | | | | |
| 3 DADOS DA INJEÇÃO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BAINHA | HI | DATA / / | | | FATOR A/C | | VOLUME | | | L | | | | | | | | | |
| VÁLVULA NÚMERO | 1ª FASE / / | | | 2ª FASE / / | | | 3ª FASE / / | | | 4ª FASE / / | | | PRESSÃO MÁXIMA DE INJEÇÃO (Kg/cm ²) | VOLUME TOTAL | | | | | |
| | HI | A/C | | HI | A/C | | HI | A/C | | HI | A/C | | | | | | | | |
| | HT | PA | PI | V(sc) | HT | PA | PI | V(sc) | HT | PA | PI | V(sc) | | | HT | PA | PI | V(sc) | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TOTAIS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PA - PRESSÃO DE ABERTURA | | | | | HT - HORA DO TÉRMINO (HORA-MIN) | | | | | NI - VÁLVULA NÃO INJETADA | | | | | V - VOLUME DE CALDA | | | | |
| PI - PRESSÃO DA INJEÇÃO (Kg/cm ²) | | | | | HI - HORA DE INÍCIO (HORA-MIN) | | | | | NA - VÁLVULA NÃO ABRIU | | | | | (SACOS) | | | | |
| 4 OBSERVAÇÕES GERAIS | | | | | | | | | | 5 TOTAIS - RESUMO | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | FASE | VOL | SACOS | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | BAINHA | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | VÁLVULAS | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | TOTAL | | | | | | | | | |
| 6 VISTOS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CLIENTE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SOLOTRAT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 14 - Modelo de boletim de injeção