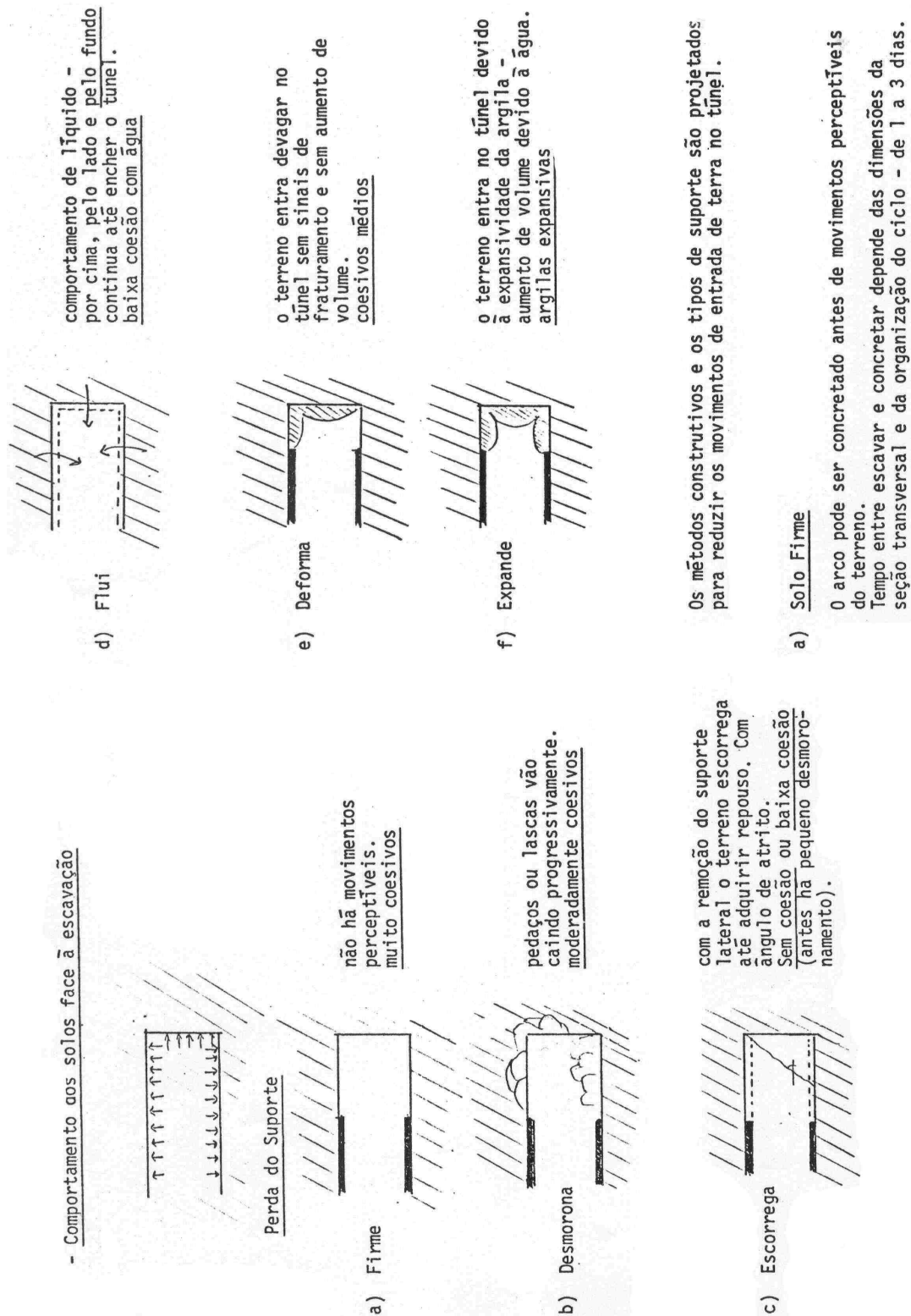
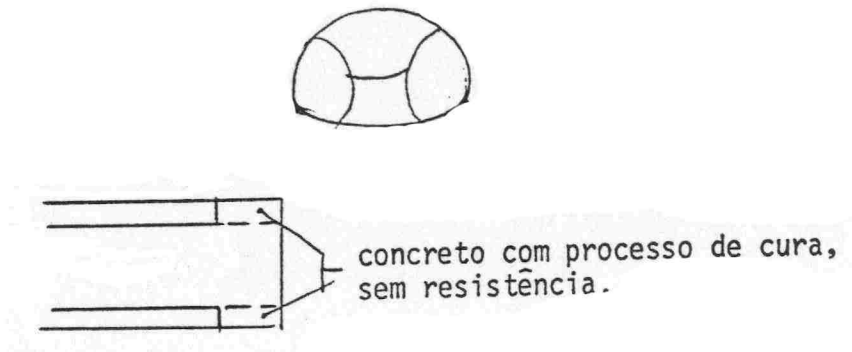


4.2 COMPORTAMENTO DO MACIÇO FACE À ESCAVAÇÃO- CLASSIFICAÇÃO DE TERZAGHI



Se o solo é firme para grande escavação - full face

Se o solo é firme para pequena escavação - drifts (seções).



Solo Firme - pode ser definido como um terreno em que a abóbada pode ser deixada sem suporte durante alguns dias (tempo de concretagem mais cura) sem haver movimentos perceptíveis do terreno.

Desde areia argilosa até argila rija, dependendo do vão e da água.

b) Solo que desmorona

O solo que cai em pedaços ou lascas, desmorona. Com o tempo, vão caindo mais e mais pedaços.

Stand-up-time – tempo entre escavação e início do processo de desmoronamento.

Depende do vão sem suporte - quanto menor o vão, maior o stand-up-time.

Se o suporte for instalado quando houver uma pequena cavidade (ou não houve contato bom entre o escoramento e o solo), o desmoronamento aumenta, mas cessa.

Se o suporte for instalado quando houver uma grande cavidade, pode haver desmoronamento até a superfície, mesmo que todo o terreno desmoronado não entre no túnel.

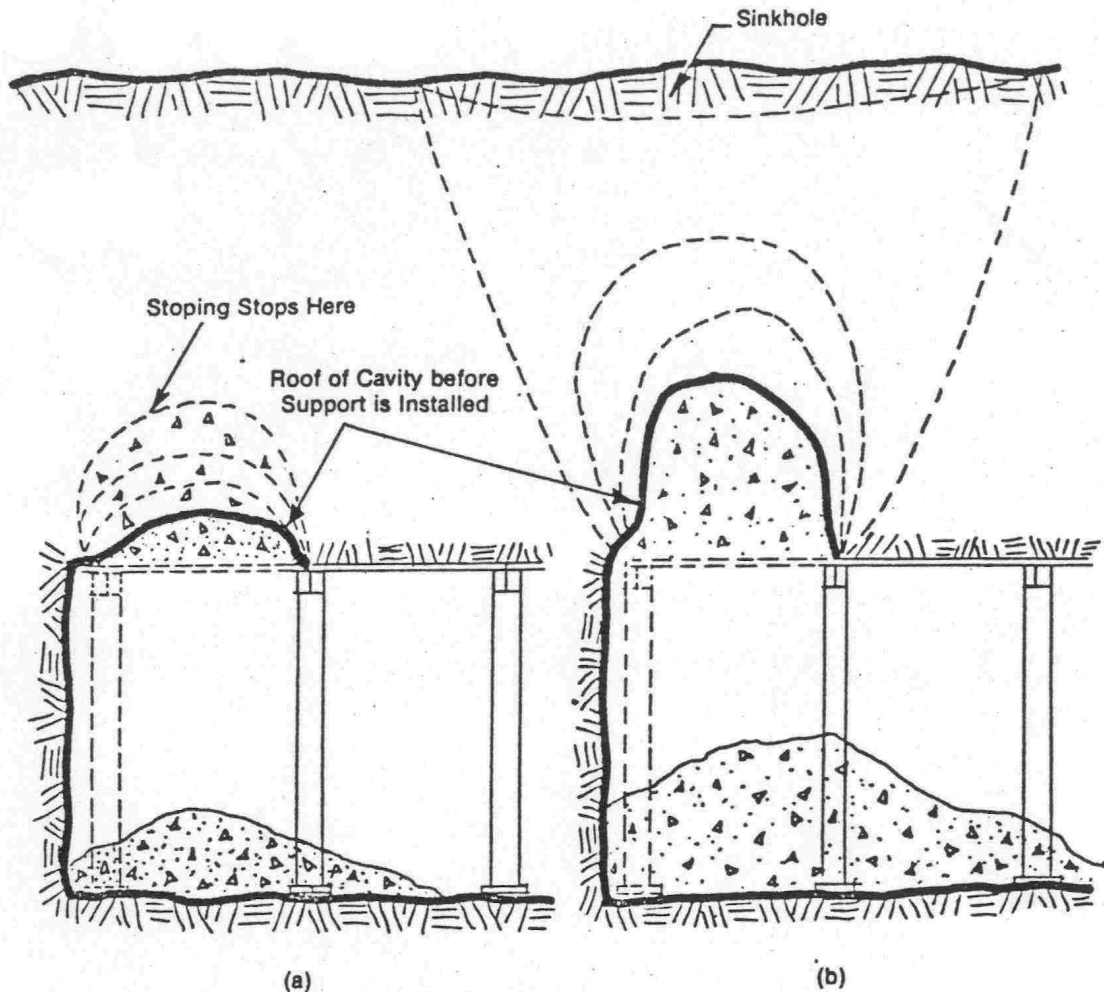


Figure 3-1 Stopping in Raveling Ground

At (a) the roof support was not installed until a small cavity had been formed by raveling. After the support was installed, without packing, raveling continued. The raveled ground has more voids and occupies a larger space than before raveling. Stopping ceases when the increase of voids equals the volume of the original cavity.

At (b) a large cavity was formed before support was installed. Stopping progressed to the surface, as the increase in void volume was still smaller than the original cavity when raveling reached the surface.

Stopping is associated with increasing load on the support. It can be avoided by packing when the support is installed.

c) Solo que Escorrega

$$R_s = 0$$

O material escorrega - "corre" - imediatamente após a abertura e somente "pára" ao atingir o repouso no ângulo de atrito γ .

Acima do N.A. – areia média/grossa/pedregulho – $R_s = 0$ – a entrada de material cessa e os efeitos se dão a curta distância.

– areia fina úmida – R_s até 7 min – há desmoronamentos devido à coesão aparente, a entrada de material é limitada e os efeitos se dão a curta distância.

Abaixo do N.A. – os solos passam a ter comportamento fluido, invadem o túnel ilimitadamente e os efeitos se fazem sentir a longas distancias. O rebaixamento ou ar comprimido conduzem o solo à condição "Acima do N.A.", motivo pelo qual o ar comprimido não estabiliza frentes de pedregulho.

d) Solo que Flui

Somente ocorre em túneis escavados abaixo do N.A. sem combate a água ou quando não funciona o sistema de combate a água)

Além disso é preciso haver baixa coesão – em solos firmes com baixa permeabilidade não há necessidade de combater a água, mas somente de drená-la.

Materiais de baixa coesão – areia pura; pedregulho; areia siltosa fina; silte inorgânico; areia argilosa; silte orgânico.

Pode funcionar como fluido ou deformável.

Comportamento de fluido depende: da coesão; permeabilidade do solo e altura hidrostática.

- areia ou pedregulho argiloso começa a desmoronar – a permeabilidade diminui por causa da argila, a parede "sua", a água começa a entrar trazendo cada vez mais pedaços para dentro do túnel. Se a coesão é baixa o desmoronamento tem o caráter de fluido.
- areia grossa ou pedregulho – vem para dentro do túnel água mais material.
- silte orgânico, mole - invade o túnel, extrudando.

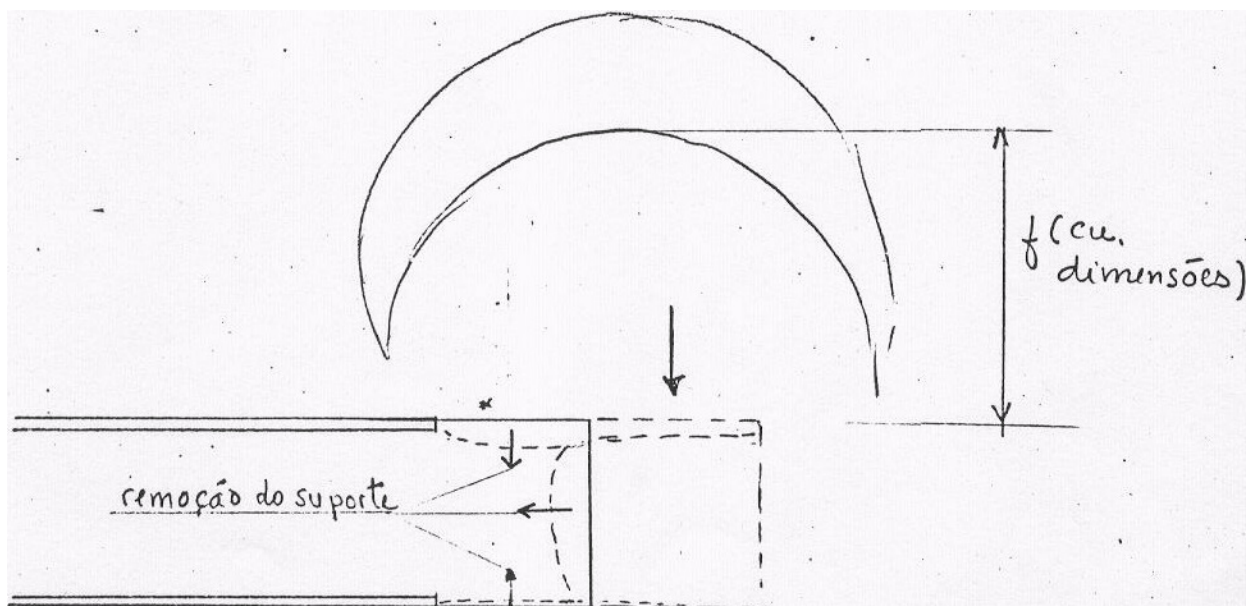
O uso de ar comprimido ou drenagem pode transformar o comportamento de fluido em: escorregadiço (areia grossa, pedregulho); desmoronável (silte inorgânico, areia siltosa, areia fina) ou deformável (silte orgânico).

- areia fina siltosa ou silte pouco argiloso – aliam baixa coesão com baixo ângulo de atrito interno – o solo entra por qualquer buraco ou junta.
- argilas pré-adensadas – O volume de terra removido é maior que o volume ocupado pelo tubo (recalques à superfície).

c) Solo que Deforma (ou que Extruda ou Extrusivo)

O solo deforma-se ocupando parte do volume escavado do túnel como qualquer material sujeito a um carregamento e com valores finitos de parâmetros de deformabilidade.

Esse comportamento é observado em argilas médias e moles – as superfícies expostas (face a teto sem suporte) avançam para dentro do túnel devagar e continuamente, em função da perturbação no campo de tensões em volta do túnel, causada pela escavação. Também argilas rijas e duras apresentam esse comportamento, mas os deslocamentos são desprezíveis.



Portanto, o volume de terra removido é maior que o volume ocupado pelo túnel e sua estrutura, ocorrendo, por consequência, recalques à superfície.

Naturalmente este campo de deformações "semi-elásticas" ocorre em todos os tipos de solos: nos solos firmes e pouco desmoronáveis, os deslocamentos são

imperceptíveis; em solos que escorregam ou fluem, o próprio peso do bloco já provoca carregamento – o solo acima também ocupa o volume correspondente ao túnel; nos solos argilosos a deformação do bloco depende da coesão, dimensões da seção transversal e cobertura. Se houver resistência suficiente haverá somente deformação "semi-elástica" e se verifica o recalque.

O mecanismo da deformação pode ser entendido pelo modelo que segue

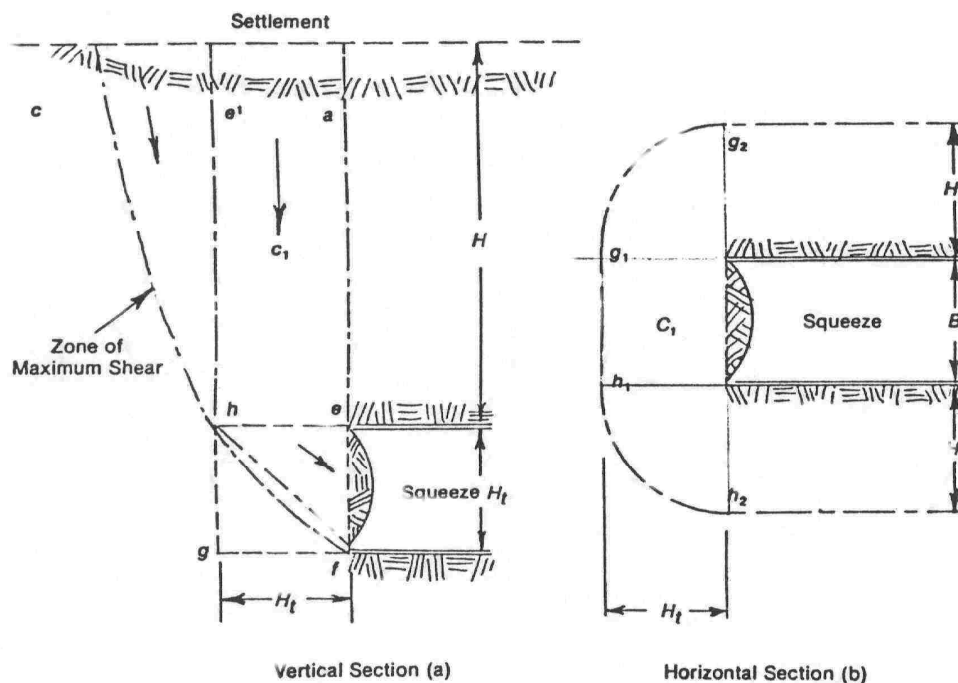


Figure 4-1 Squeeze in a Clay Tunnel

The block of clay *efgh* carries the weight of the prism of clay located above *eh*. When the tunnel arrives at *ef* the block is no longer confined. It bulges into the tunnel and the prism subsides. In so doing, it mobilizes the shearing strength of the clay at its lateral and forward boundaries and transfers part of its weight to the sur-

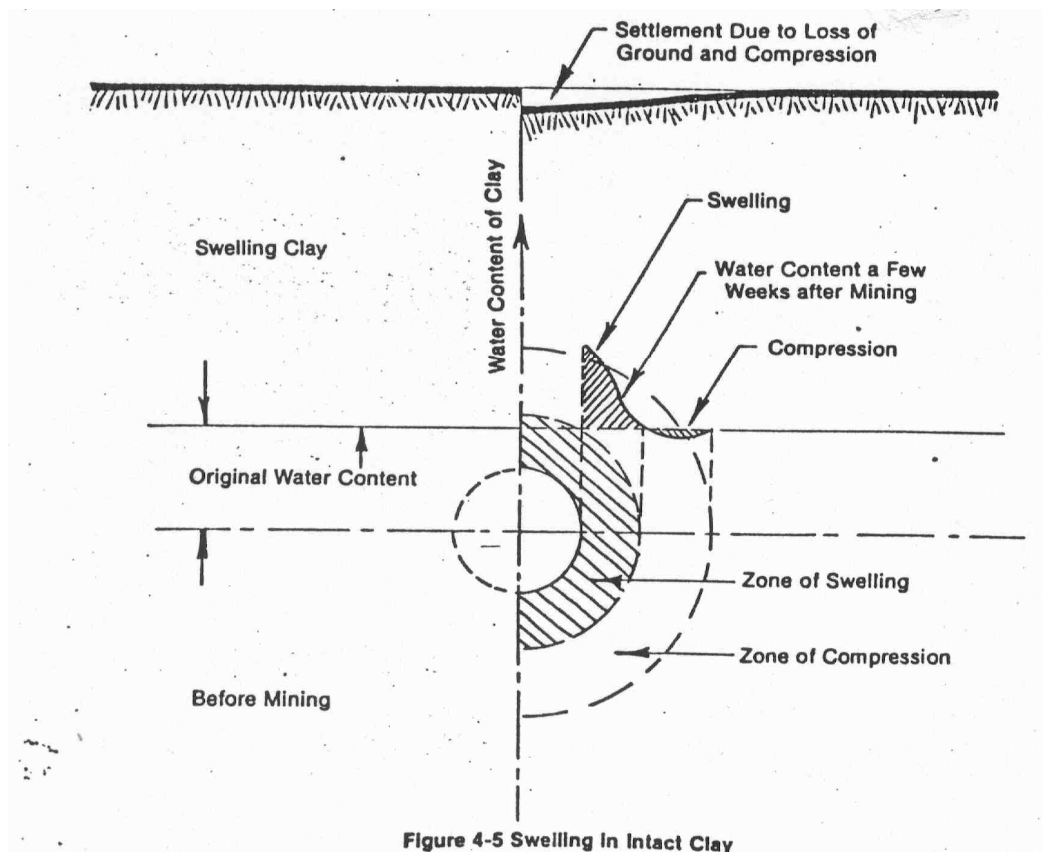
rounding ground by half-dome action.

If the strength of the clay in the block is at least twice as great as the restrained weight of the prism, no further bulging occurs. If the strength is less than twice, the face continues to bulge into the tunnel. This continued bulging is called the *squeeze*.

Este modelo adota hipóteses simplificadoras muito severas, no que diz respeito, principalmente à geometria do mecanismo de ruptura. Evidentemente há outros modelos, que permitem avaliar a estabilidade da frente e que serão vistos mais adiante.

d) Solos Expansivos

São argilas rijas que expandem tão logo ficam expostas – o volume aumenta pela – absorção de água. O comportamento é o de solo firme, pouca ou nenhuma deformação. Entretanto, nestas argilas altamente pré-adensadas o revestimento será submetido a tensões grandes, no entanto, nunca maiores do que correspondente à cobertura inicial. As argilas rijas podem estar intatas ou fissuradas (por causa do alívio). A água caminha para dentro do túnel.



When a tunnel is excavated, the clay at both sides must carry not only the overburden directly over it, but also the load of the overburden directly over the tunnel, transferred onto the clay by arch action. At the same time, the clay at the tunnel walls is no longer restrained. The increased pressure squeezes some water out of the clay in the zone of compression toward the tunnel into the zone

of swelling where the compression has been released. Expansion of the clay into the tunnel. Because expansion, the diameter of the tunnel decreases. Settlement of the ground surface due to semi-elastic and to compaction in the zone of compression is the tunnel is carelessly mined, the settlement due of ground can become very important.

O solo pode ser considerado

Firme - se concretado antes do início do processo

- se a concretagem demorar alguns dias, haverá desmoronamentos, e, após algumas semanas o aumento da pressão sobre o suporte será muito grande.

e) Outros

Solos residuais ao serem expostos expandem perdendo resistência. Particularmente, as juntas enfraquecem muito. Estes efeitos são ainda mais severos na presença de água. O método construtivo, em tais tipos de solo, deve buscar suporte imediato ou antecipado, evitando ao máximo o alívio de tensões. Até a colocação do suporte poderão sobrevir grandes esforços. O método construtivo deve prever mínima exposição e mínima drenagem “direta”, sendo preferível “cortar” a alimentação de água.

4.3 ESTABILIDADE DA FRENTE

A frente da escavação, independentemente de sua própria estabilidade, tem um papel fundamental na estabilidade dos maciços escavados e suportados com concreto projetado porque serve de apoio ao maciço aliviado pela escavação, enquanto os elementos que constituem o suporte não adquirem a eficácia necessária: esta falta de eficácia do suporte pode ser causada pela falta de condições da sua fundação, pela insipiência da resistência do concreto projetado ou qualquer outro motivo que limite a capacidade de confinamento do suporte. Assim, a perda de estabilidade da frente - ou mesmo a ocorrência de deslocamentos excessivos - poderá causar uma solicitação incompatível com a resistência ainda incipiente do suporte junto à frente. Portanto, quando a estabilidade da frente não puder ser garantida podem ser utilizados dois tipos de intervenção:

- Melhoria das condições da própria frente, seja reduzindo suas dimensões através de parcialização, seja através de melhoria das características de resistência obtidas por drenagem, aplicação de ar comprimido, atirantamento, chumbamento, tratamento e outros métodos.

- Busca de apoio independente da falta de suporte provocada pela instabilização ou deslocamentos excessivos da frente, seja através de enfilagens longas, seja através de pré-revestimento.

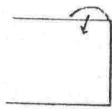
A estabilidade da frente depende, entre outros fatores das suas dimensões e das características do maciço, sendo fortemente influenciada pelas condições de drenagem, especialmente em solos arenosos,

Devem ser distinguidos dois tipos de estabilidade: estabilidade local e estabilidade global.

ESTABILIDADE LOCAL □□□□(*)

ESTABILIDADE GLOBAL

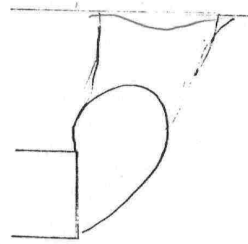
TETO OU LATERAL



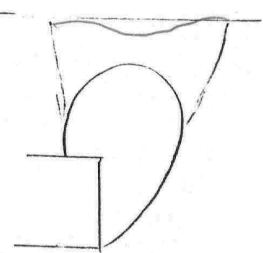
FRENTE



FRENTE

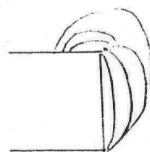
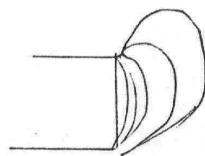
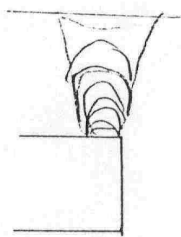


FRENTE E TETO

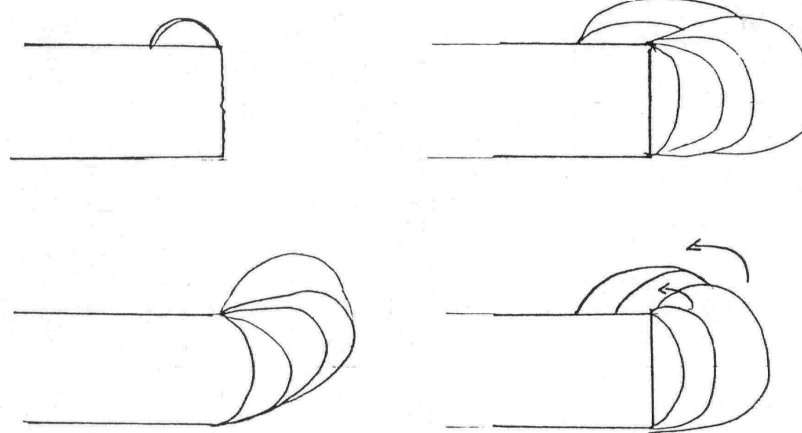


ESTABILIDADE LOCAL

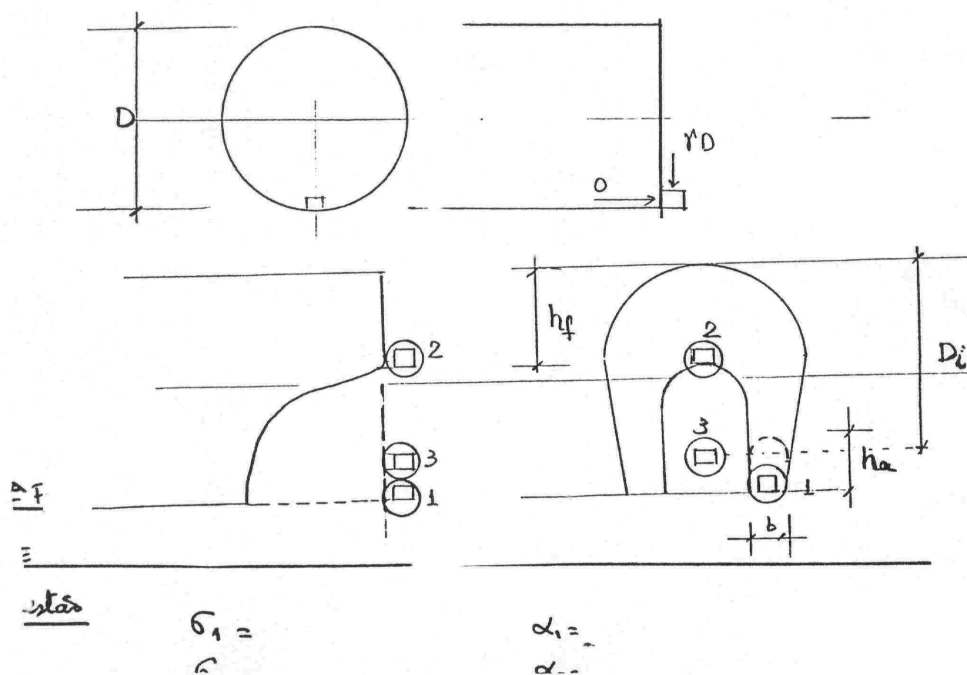
Se o desmoronamento não é _____ controlado, progride (eventualmente até a superfície) ou propiciar instabilização de maior região.



(*) Na instabilidade local os deslocamentos à superfície são imperceptíveis enquanto na global são significativas.

LOCAL

Tratando-se de mecanismos que levam em conta somente o peso próprio do solo limitado pelo contorno da escavação, deve ser verificado que as tensões dele decorrentes não excedam a resistência à compressão simples no ponto mais desfavorável. No caso da seção plena, deve ser verificado que $\gamma \cdot D < R_c / FS$.

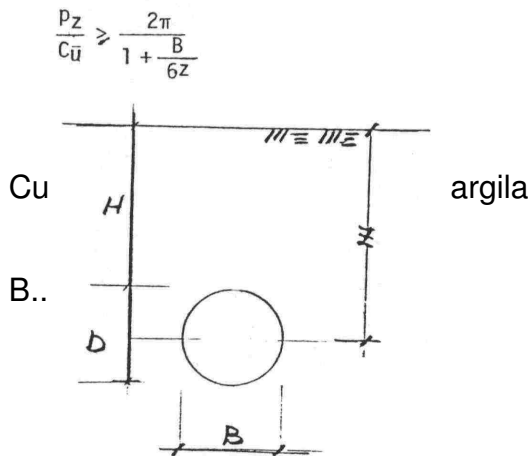


aplicação do número da estabilidade para verificação da estabilidade global^(*)

Estabilidade Local: bastam tensões de confinamento pequenas porque o fenômeno não envolve o peso do maciço acima do túnel, ao contrário da global.

^(*) modelo mais simples – ver também modelo para comportamento de furos deformáveis.

Investigações conduzidas por Broms e Bennermark (Stability of clay at Vertical Openings - Journal ASCE 3 - 71 - 94.1967) concluíram que a ruptura de uma face vertical circular de uma abertura em solo coesivo homogêneo ocorre quando:



P_z ... tensão vertical total na altura do eixo do túnel $p_z = \gamma(H + \frac{B}{6Z})$ (para $H \gg D$)

Para $\frac{Z}{B} \geq 2,5$ ou $\frac{H}{D} \geq 2$ (túneis profundos) o valor crítico de $\frac{P_z}{C_u}$ é igual a aproximadamente 6. Para $\frac{Z}{B} \leq 2,5$ ou $\frac{H}{D} \leq 2$ (túneis rasos) o valor crítico de $\frac{P_z}{C_u}$ passa a ser calculado por:

$$\frac{P_z}{C_u} = \frac{2\frac{Z}{B} + 1}{1 + \frac{B}{6Z}}$$

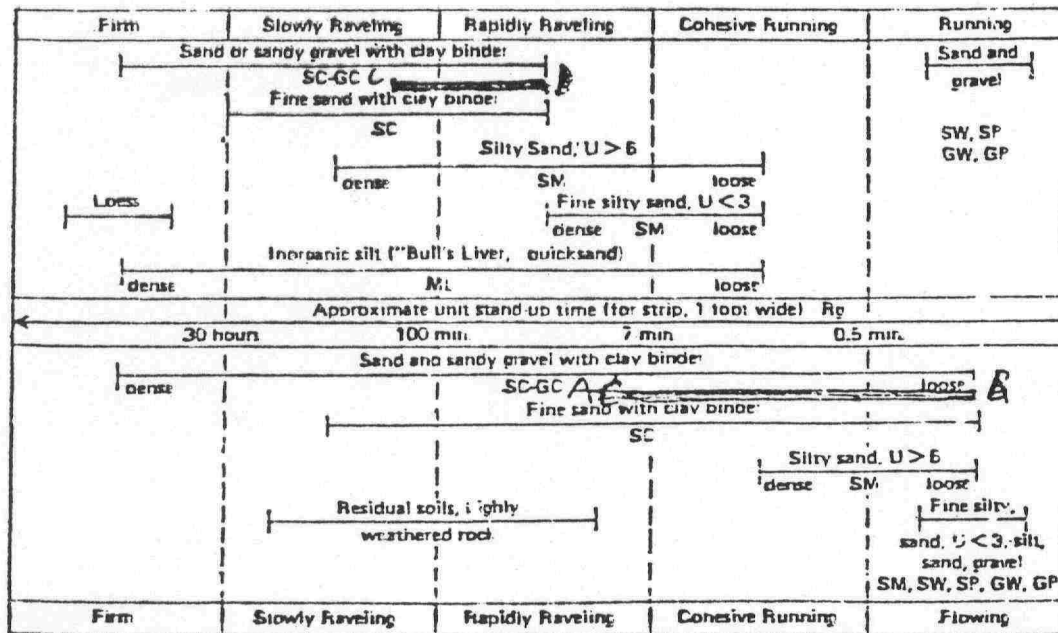
Esta expressão pode ser aplicada considerando o valor de C como o valor médio da resistência ao cisalhamento da argila até uma distância igual a um diâmetro da escavação. Outrossim se a variação de C_u com a profundidade for muito importante, a aplicação das formulas é conservadora, podendo-se utilizar os limites propostos

por Peck para o número de estabilidade $N_t = \frac{P_z}{C}$ baseados em observação de túneis executados pelo método da couraça.

$N_t = \frac{P_z}{C_u} \leq 4$, caso em que a velocidade de deformação da argila para dentro do túnel não constitui problema

$$N_t = \frac{p_z}{C_u} \leq 5, \text{ caso limite da aplicação}$$

quando possível, estimar-se a estabilidade do teto de solos desmorroneáveis através do tempo de auto-sustentação, o qual como já mencionado, pode ser avaliado por tabelas práticas, entre as quais a reproduzida abaixo.



ESTABILIDADE DE TETO

4.4 CONTROLE DA ÁGUA NA ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS

4.4.1 Introdução

A presença da água no solo, na escavação de túneis abaixo do lençol freático, é responsável por uma série de problemas, que vão desde a instabilidade da face até o colapso do túnel, levando a interrupções prolongadas da obra.

O ciclo de avanço do túnel será afetado pelo processo adotado de controle da água, pelas dificuldades de manuseio do material saturado escavado e pelas condições difíceis de movimentação dos equipamentos.

Assim, a execução de um túnel abaixo do lençol d'água exige o emprego de processo de rebaixamento do nível d'água ou de controle da água, através do emprego de ar comprimido, ou tratamento do solo – injeções, congelamento, etc... (do mais barato ao mais caro)

Só quando o nível d'água se encontra a pequena altura acima do piso do túnel e não houver risco de carreamento de material, pode-se recorrer à drenagem pela face do túnel com coleta da água e bombeamento para a superfície.

Em túneis abaixo do nível d'água, a escolha do método de controle e do método construtivo não são variáveis independentes.

Os métodos de controle da água rebaixamento, ar comprimido, tratamento, alteram o comportamento e a resistência do solo, fato que deve ser levado em conta na definição do método construtivo.

É preciso ainda avaliar, em termos de custo e tempo, a influência do método de controle da água na velocidade de avanço da escavação, eficiência dos equipamentos, necessidade de interrupções da obra, etc.

Afim de prever, adequadamente o método de controle da água é preciso obter informações detalhadas a respeito:

- da configuração geométrica dos limites verticais e horizontais, entre as diferentes camadas de solo, nas vizinhanças do túnel;
- da posição do nível d'água, em relação ao eixo do túnel, e sua variação sazonal;
- da granulometria, do diâmetro efetivo D₁₀, da porosidade, da densidade relativa e da permeabilidade dos estratos arenosos;
- da resistência não drenada das argilas e das areias argilosas.

Quando a magnitude da obra e a economia resultante o justificar, pode ser conveniente a execução de ensaios, através de poços de rebaixamento.

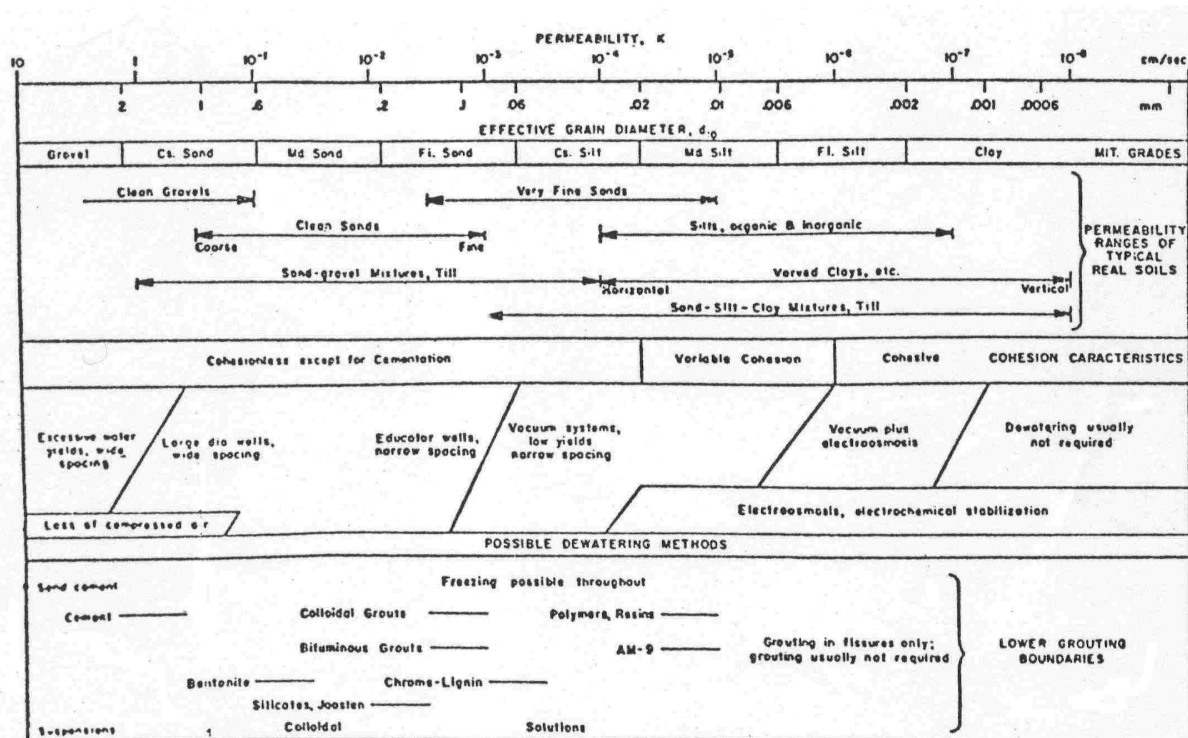
A análise dos dados obtidos permite prever:

- características e proporções do sistema de rebaixamento;
- gradientes hidráulicos, risco de carreamento de material e estabilidade da face e das paredes do túnel;
- solos que não podem ser rebaixados por processos normais;
- e caso se conclua que o rebaixamento não pode ser empregado, esses mesmos dados fornecerão indicações relativas à:

1. pressão de ar comprimido necessário;

2. injetabilidade dos solos.

Abaixo é reproduzido o quadro proposto por B. Schmidt (1974), onde o autor relaciona a permeabilidade, o diâmetro efetivo e o tipo de solo com os processos de rebaixamento e injeção e seus limites de aplicabilidade.



Correlations of Permeability, Soil Character, Dewatering, Grouting Response from Various Sources

A seguir são apresentados os processos de remoção da água e seu efeito sobre os vários tipos de solo. Via de regra os raciocínios são feitos para solos supostos homogêneos. Entretanto, os depósitos de materiais geralmente consistem de camadas lentes ou bolsões de materiais de granulometrias diferente, alguns muito mais permeáveis que outros. A execução de uma drenagem completa ou a impermeabilização através de injeções em tais solos, apresenta dificuldades suplementares.

As piores condições impostas pela existência de lençol freático são a fluidez (areia) ou o escoamento (deformação rápida de argilas moles ou muito moles). O controle da água leva o solo de fluido desmoronável e diminui a velocidade de deformação evitando escoamento das argilas.

4.4.2. Rebaixamento do lençol d'água subterrâneo

O que é importante não é retirar a água e colocar ar em seu lugar. O que interessa é evitar o gradiente hidráulico que carrega o solo para dentro da escavação.

A escolha do método de rebaixamento é condicionada pela permeabilidade das camadas do solo, pelo volume dos aquíferos, pela hidrogeologia da região e pela posição do eixo do túnel em relação a superfície do lençol freático.

Drenagem direta

No caso de argilas ou solos arenosos finos e muito compactos é possível drenagem direta sem que haja carreamento. Mesmo o bombeamento através do poço de partida pode resolver, dependendo da permeabilidade do material. Em alguns casos pode ser utilizado um túnel piloto, de menores proporções e de execução muito rápida.

São também utilizados anéis drenantes, que são tubos flexíveis e perfurados na parte em contato com o solo. Servem para coletar água de infiltração na parte superior do túnel e conduzi-la até canaletas.

Em túneis executados com concreto projetado os anéis ficam fixos no local ao receber a camada de concreto.

Esse processo é indicado para complementar outros métodos de rebaixamento.

Ponteiras filtrantes

São compostas por tubos filtrantes, preparados de maneira adequada, para diferentes tipos de solo. São cravados a pequenas distancias entre si e ligados através de um coletor a uma bomba de vácuo e a uma bomba de recalque de água.

As ponteiras podem ser convencionais ou com vácuo.

Nas ponteiras convencionais o vácuo é empregado apenas para succionar a água, drenada para o interior da ponteira. Estas são utilizadas em solos permeáveis que fornecem grandes vazões.

As ponteiras têm uma capacidade de rebaixamento do nível da água de aproximadamente 4,5 m. Para alturas maiores de rebaixamento executa-se uma nova linha de ponteiras em cota inferior.

As ponteiras a vácuo só diferem das convencionais por serem dimensionadas para rebaixar o nível d'água em solos de menor permeabilidade (siltes arenosos, areias argilosas, etc.).

O vácuo aplicado deve também provocar uma diferença de potencial que induz o fluxo da água em direção as ponteiras.

As ponteiras, em túneis, podem ser utilizadas quando a altura de rebaixamento não excede 5m e ainda quando o lençol freático encontra-se perto do fundo da escavação.

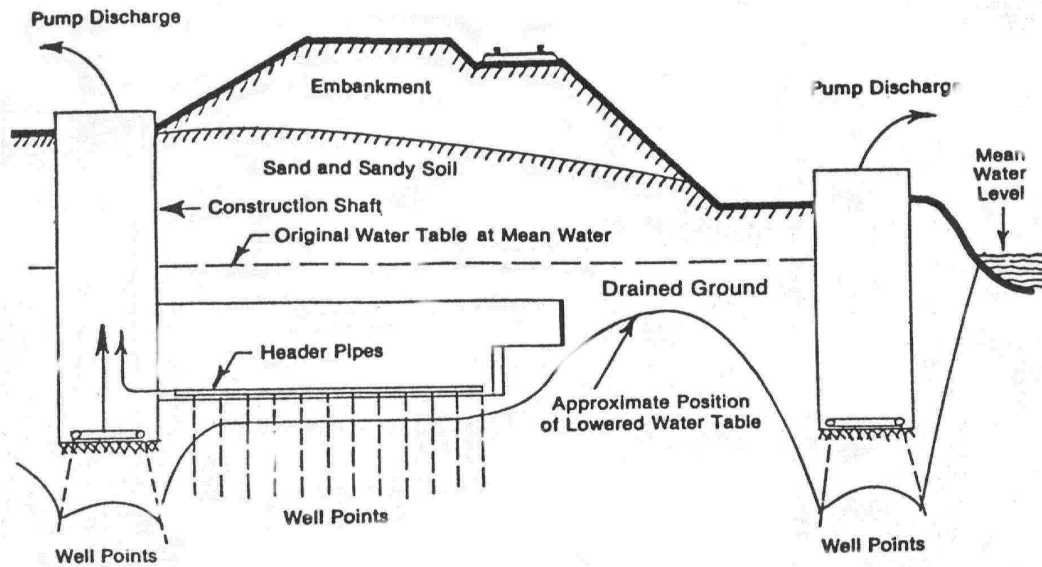
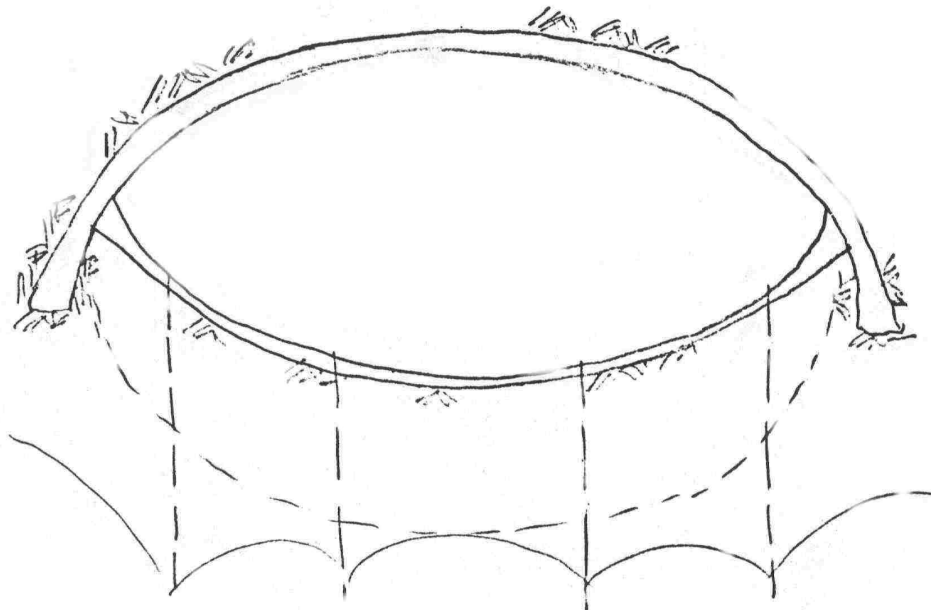
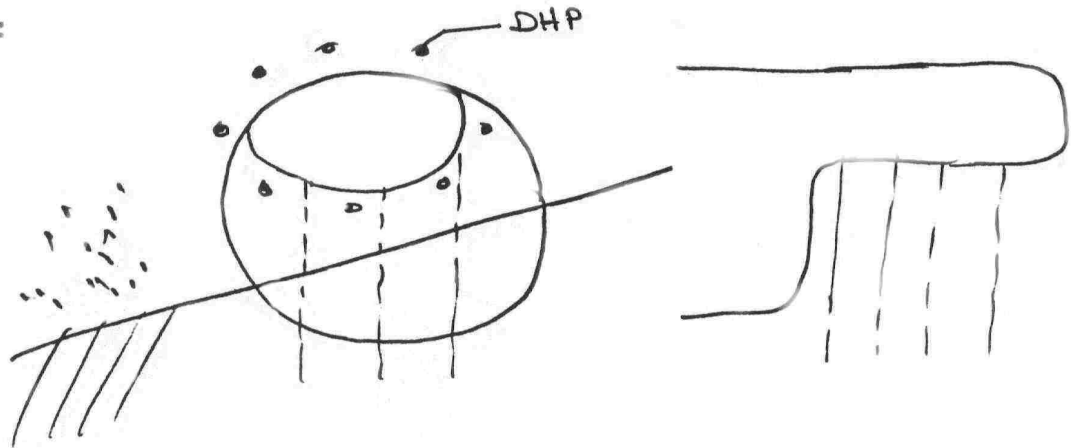


Figure 5-1
Relatively short tunnel. Ground drained through use of well points in bottom of shafts. Also use of well points jetted down in bottom of tunnel.



Em caso de contatos, difíceis de "secar" através de poços, o uso de ponteiros é quase obrigatório.

Exemplo:



Poço profundos

São poços executados de forma semelhante aos poços de captação de água. São constituídos de tubos filtros, envoltos em pedrisco, instalados em furos previamente abertos. Não têm limite de profundidade e são executados em torno da obra, antes do início da mesma, de forma que o lençol esteja rebaixado por ocasião da escavação do túnel.

Os poços profundos podem ser gravitacionais ou associados à aplicação de vácuo.

Nos poços gravitacionais a drenagem da água ocorre por gravidade, o que se aplica a areias limpas.

Nos poços a vácuo a água é "atraída" para o poço pela ação do vácuo criado. O processo permite a drenagem com maior eficiência em areias siltosas e argilosas.

O bombeamento da água é feito por bombas submersas instaladas dentro dos poços.

Ejetores ou Injetores ("Jet Eductor")

Através de um sistema "VENTURI", provoca-se a sucção da água do solo pela criação de um vácuo na base do tubo. Assim, este sistema não tem limitação de profundidade. São indicados de preferência para solos de baixa vazão e de permeabilidade média a baixa, como as areias argilosas. Neste caso, são mais econômicos e eficientes que os poços profundos a vácuo.

Drenos horizontais

Adequados para drenar a frente do túnel em locais onde seria impossível a execução de poços verticais. Podem ser rasos ou profundos e consistem na instalação de tubos perfurados em furos previamente abertos.

Atrapalha a execução do túnel, pois tem comprimentos limitados. Muito úteis quando o solo apresenta fissuras, pois captam a água antecipadamente.

Outros

Exemplo: eletro-osmose

Efeito do Rebaixamento nos diversos tipos de solo

O rebaixamento tem um efeito benéfico nos solos granulares, especialmente se eles forem compactos, desenvolvendo uma coesão aparente por efeito da capilaridade. Por essa razão é que o nível da água deve ser rebaixado até abaixo do piso do túnel.

Nas areias fofas, que tendem a reduzir de volume sob o efeito da escavação do túnel, pode ocorrer um aumento de pressão neutra nos vazios do solo o que pode provocar o desaparecimento da tensão capilar e da coesão aparente resultante.

O mesmo efeito estabilizador se verifica nas areias argilosas rebaixadas a vácuo.

Os siltes e areias siltosas, com permeabilidade inferior a 10^{-5} cm/s, são os materiais que mais criam transtorno, quer pela dificuldade de serem domados por processos normais, inclusive o processo a vácuo, quer pela facilidade com que são carregados pelo fluxo da água, desmoronando.

As argilas e argilas arenosas são relativamente impermeáveis, e não costumam requerer rebaixamento. Qualquer infiltração visível de água é devida a alguma intrusão de solo mais permeável. As argilas também não estão sujeitas a carregamento de material ou a desmoronamentos, devido ao fluxo de água. Entretanto, é preciso não esquecer que a presença do lençol d'água cria uma

pressão adicional que vai atuar na escavação e no escoramento. Em virtude da baixa resistência das argilas moles a rijas, a presença d'água acaba por criar problemas de deformação excessiva e instabilidade.

Nas argilas duras, a água não cria nenhum problema especial, se $N = 7$ argila será submetida a tensões que provocavam sua ruptura tornando difícil manobrar o shield.

Controle da água por Tratamento

Em situações em que não seja possível executar o rebaixamento do lençol d'água ou empregar ar comprimido e em situações de emergência pode se impermeabilizar e consolidar o terreno, na lateral ou na frente do túnel, por injeções.

Através de injeções, os solos arenosos e pedregulhosos, abaixo do nível d'água, podem se transformar num solo granular coesivo e mais impermeável e se comportar de forma satisfatória, durante a escavação.

As injeções podem ser executadas a partir da superfície, de galerias previamente escavadas no terreno, ou a partir da face do túnel, através de furos segundo as geratrizes de cones concêntricos.

A A.F.T.E.S. fornece uma tabela quanto aos tipos de calda, conforme se deseje impermeabilizar ou consolidar os diversos tipos de solo.

As recomendações normais de tipos de injeção podem ser seguidas, permitindo-se "Clacagem" ou mesmo outros tipos de tratamentos, como enfilagens injetadas, CCP, CEP horizontal, etc.

A utilização do tipo de tratamento depende de muitos fatores, como utilizar ou não a superfície, execução através de túneis auxiliares ou pilotos.

Jet Grouting

A eficiência das injeções dependem da permeabilidade do solo, a qual não é “respeitada” pelo “jet-grouting”. Entretanto, a limitação para a utilização do “Jet-Grouting” é a dureza, rigidez ou compacidade do solo.

Congelamento – não há limitação

Um método alternativo de grande eficácia no controle de água do lençol freático e estabilização do solo, em escavação de túneis é o congelamento artificial.

Algumas características dos solos tais como: granulometria, estratificação, etc., que podem inviabilizar a utilização de outros métodos de controle de água do solo, como o ar comprimido ou as injeções, têm efeito apenas limitado sobre o congelamento.

O princípio do congelamento artificial do solo é a remoção, através de um agente refrigerante, do calor armazenado, num determinado volume de solo, convertendo em gelo a água dos vazios.

O congelamento artificial embora preferencialmente se aplique a solos saturados, pode ser utilizado em solos com apenas 10% de grau de saturação.