



Prefeitura Municipal de Curitiba

Secretaria Municipal de
Planejamento e Administração

Rua Solimões, 160

Fone: 3350-9022

80.510.140

São Francisco

Curitiba - PR

www.curitiba.pr.gov.br

ANEXO III

DIRETRIZES BÁSICAS DO PROJETO

VOLUME IV - PROJETO DE ENGENHARIA E MATERIAL RODANTE

PROJETO DE OBRAS SUBTERRÂNEAS



Sumário

3.2.3. Projeto de Obras Subterrâneas	3
3.2.3.1. Aspectos Geológico-geotécnicos.....	3
3.2.3.2. Condicionantes	6
3.2.3.3. Experiência Recente com Máquinas Tunneladoras no Brasil	9
3.2.3.4. Método Construtivo	14
3.2.3.5. Parâmetros Operacionais	25
3.2.3.6. Partidas e Chegadas do Shield	42
3.2.3.7. Arraste do Shield	54
3.2.3.8. Revestimento.....	55
3.2.3.9. Simulação Numérica	59
3.2.3.10. Transporte da Máquina.....	67
3.2.3.11. Especificações dos Equipamentos Básicos para Shield EPB	68
3.2.3.12. Considerações Finais	80
3.2.3.13. Referências	82



3.2.3. Projeto de Obras Subterrâneas

As descrições, apresentadas neste item, têm por objetivo apresentar recomendações técnicas para a especificação de máquina tuneleira de 11 m de diâmetro, a ser empregada na construção do túnel de via da Linha Azul do Metrô de Curitiba.

As informações, apresentadas a seguir, servem para subsidiar a decisão de escolha do tipo de equipamento mais apropriado para a obra, bem como de alguma de suas características técnicas.

Todas as verificações realizadas tiveram por base os dados geotécnicos disponíveis até a presente data e, portanto, ressalva-se que as considerações poderão ser revistas com a obtenção de dados mais recentes.

3.2.3.1. Aspectos Geológico-geotécnicos

Estão apresentados, a seguir, aspectos geológicos e geotécnicos da região de implantação do metrô.

a) Contexto geológico regional

Conforme Kormann (2012), a Região Metropolitana de Curitiba situa-se em uma bacia sedimentar, cuja origem remonta aos períodos Oligoceno-Mioceno e o Pleistoceno. Como as bacias sedimentares de São Paulo e do Sul Fluminense, a bacia sedimentar de Curitiba pertence ao Rift Continental do Sudeste do Brasil, sendo preenchida, em sua maior parte, pela Formação Guabirotuba.



Os sedimentos argilosos são os principais representantes dessa formação e o principal objeto de destaque nesse item. Algumas de suas características geotécnicas guardam estreita semelhança com as da Bacia Sedimentar de São Paulo.

Pré-faturamentos de origem tectônica e pressões de sobreadensamento nas argilas cinza esverdeadas são algumas das semelhanças das camadas argilosas dessas formações. Outra semelhança marcante reside na característica expansiva dessas argilas e no aspecto “empastilhado” ao serem expostas ao ar atmosférico.

Esses sedimentos costumam se apresentar com elevada resistência à penetração do amostrador padrão do ensaio de sondagem de reconhecimento SPT. Na maior parte, são sedimentos essencialmente argilosos (argilas siltosas), com bom comportamento geomecânico.

No entanto, como alertado por Kormann (2012), quando escavadas, essas argilas podem se tornar potencialmente instáveis. Ressalva feita aos extratos mais superficiais, que tendem a se apresentar com baixa resistência e elevada compressibilidade, dado o processo de intemperização e lixiviação que sofreram ao longo do tempo.

Sotoposto aos sedimentos terciários, ocorrem rochas gnáissicas e seus derivados de origem pré-cambriana, que tendem a se apresentar bastante alterado e muito fraturado, como resultado da ação do intemperismo físico e químico. São materiais que podem não apresentar um bom comportamento diante de uma escavação, com possíveis mecanismos instabilizadores sendo governados pelo sistema de fraturamento e de descontinuidades.

Adicionalmente, esses materiais são também caracterizados por elevados módulos de deformabilidade, o que deve caracterizar baixos recalques na superfície. Por



conta disso, apresentam o inconveniente de romperem sob pequenas deformações, caracterizando rupturas frágeis (“sem aviso”).

Isso reforça a necessidade de tratamento e atenção especial aos resultados de instrumentação. No entanto, devido à anisotropia e reologia típicas desses materiais, não estão descartadas deformações além das expectativas iniciais.

Sobrepostos a esses, localmente, ocorrem depósitos recentes de argilas moles quaternárias e aterros lançados, que apresentam baixa resistência à penetração do amostrador padrão do ensaio SPT e elevada deformabilidade. Não devem apresentar nenhum problema às escavações.

b) Parâmetros geotécnicos

Kormann (2012) e Boszczowski (2008) apresentam algumas propriedades índices das argilas da formação Guabirotuba. Ambos fazem a ressalva da grande dispersão existente nos resultados em função da estruturação desses solos. Boszczowski e Ligocki (2013) apresentam parâmetros geomecânicos para os solos residuais em função do perfil de evolução pedológica. Os parâmetros utilizados estão sintetizados na tabela, a seguir:

Parâmetros Geotécnicos

Solo	γ (kN/m ³)	E_0 (kPa)	μ	c' (kPa)	ϕ' (graus)	OCR	K_0
Argilas intemperizadas	18,4	50.000	0,3	24	27	1,0	0,8
Argilas não intemperizadas	19,0	100.000	0,3	40	23	1,0	0,8
Maciço pré-cambriano - solo residual maduro	15,6	11.000	0,3	19	26	1,0	0,44
Maciço pré-cambriano - solo residual jovem	17,2	3.600	0,3	27	32	1,0	0,53



3.2.3.2. Condicionantes

Estão apresentados, a seguir, aspectos condicionantes que embasam os estudos para definição do diâmetro do túnel do metrô.

a) Premissas

As análises foram realizadas considerando as premissas elencadas a seguir:

- Diâmetro da tuneladora.....11 m;
- Mínima cobertura de solo/rocha sob corpos d'água.....15 m;
- Mínima cobertura de solo.....10 m (equivalente a um diâmetro);
- Máxima rampa.....4%;
- Mínima rampa.....0,5%.

b) Topografia

O relevo ao longo do traçado é bastante acidentado, com oscilações entre cotas máximas e mínimas variando constantemente. Isso faz com que o traçado longitudinal oscile em diversos pontos em rampas máximas em torno de 4%. As máximas cotas superficiais verificadas ocorrem em torno da cota 940 m, ao passo que as cotas mínimas verificadas ocorrem em torno da cota 890 m.

Conseqüentemente, foram verificadas coberturas mínimas em torno de 10,7 m e coberturas máximas em torno de 23,7 m.



c) Carga hidráulica

Em geral, o lençol freático local ocorre próximo à superfície, entre 1 e 2 m de profundidade, mas podendo ocorrer em profundidades de até 7 m em trechos localizados. Devido à falta de informações complementares, foi considerado um único nível d'água atuando até as profundidades de escavações.

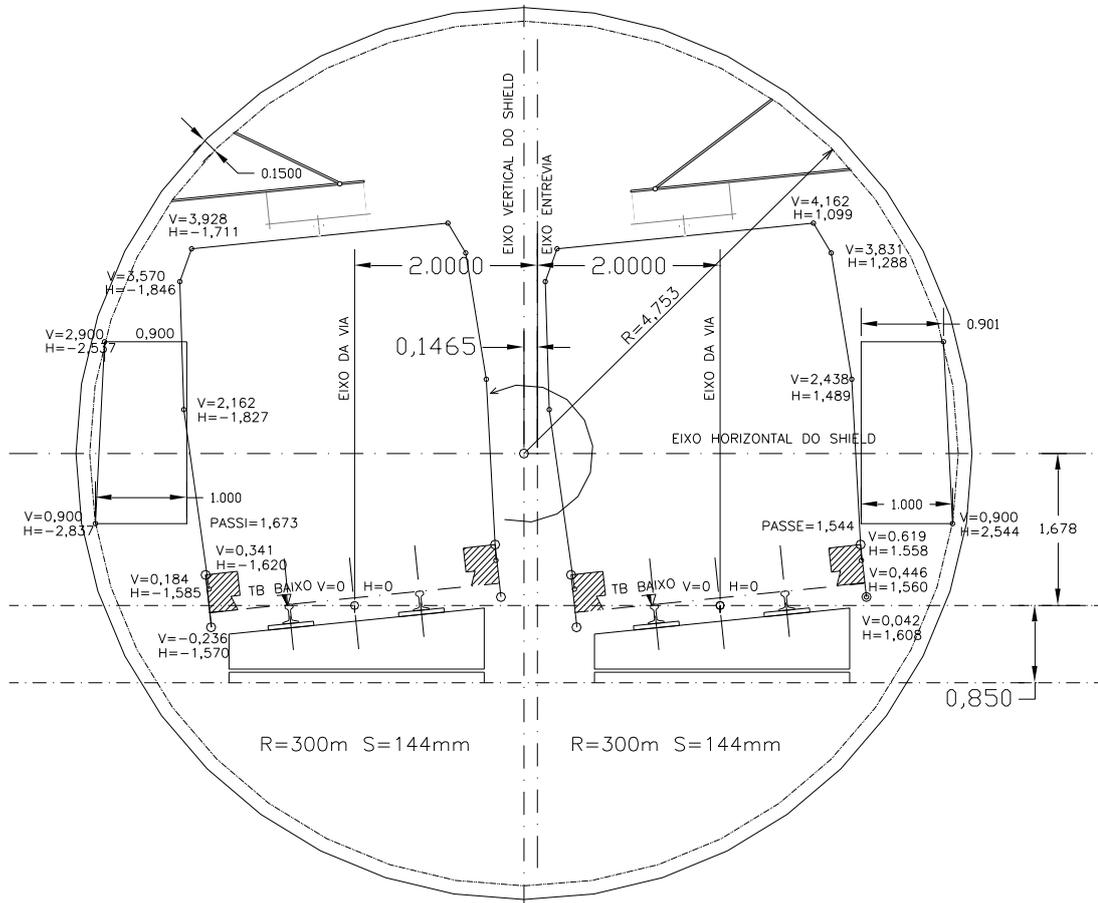
Conseqüentemente, foram verificadas variações de pressões hidrostáticas entre 11 e 27 m em relação ao eixo do túnel.

d) Gabarito dinâmico

O estudo do gabarito dinâmico foi realizado considerando trens tipo da fabricante CAF com alimentação elétrica por catenária rígida, os mesmos adotados nas Linhas 4 e 5 do Metrô de São Paulo.

Nesse estudo, foi considerada uma condição em curva de raio de 300 m, com superelevação de 144 mm. A folga construtiva adotada foi de 15 cm no raio.

A figura, a seguir, apresenta o gabarito utilizado nos estudos para determinação do diâmetro interno da tuneladora.



Gabarito dinâmico utilizado nos estudos para determinação do diâmetro interno do túnel em shield

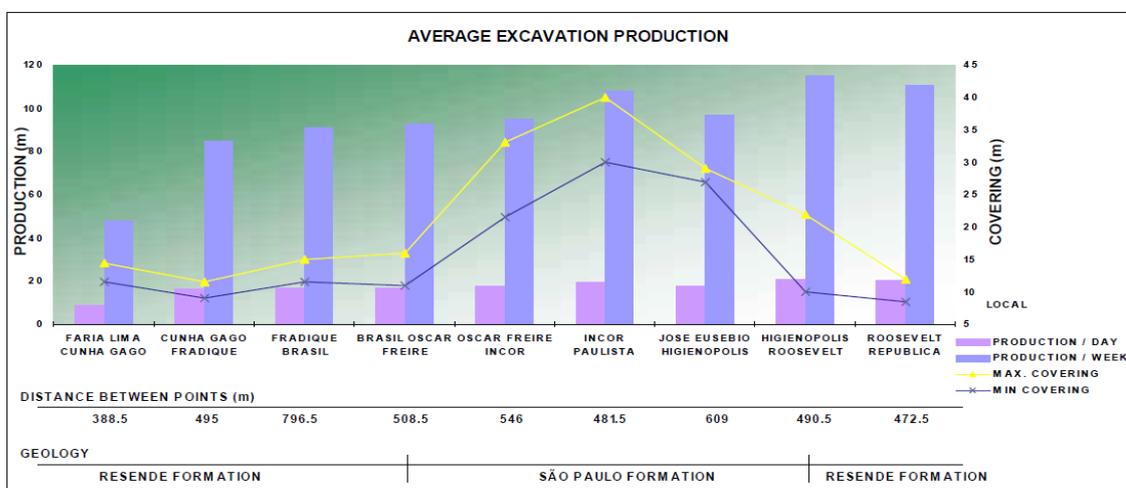
Dos resultados, o diâmetro interno do túnel considerado nesse parecer será de 9,81 m. Considerando um anel de revestimento de 45 cm de espessura e um espaço anelar de 15 cm, o diâmetro de escavação da tuneladora considerado será de 11 m.



- Peso da parte central.....350 tf (comprimento = 3.120 mm);
- Peso da parte da cauda.....75 tf (comprimento = 4.080 mm);
- Comprimento da couraça.....12 m;
- Peso da peça mais pesada.....150 tf;
- Macacos de empuxo.....30 macacos montados em pares a cada 24 graus;
- Empuxo máximo.....85.000 kN;
- Torque máximo.....26.000 kN.m;
- Diâmetro interno do anel.....8.430 mm;
- Espessura do anel.....350 mm;
- Composição do anel.....7 segmentos mais 1 de chave.

b) Produção

Desconsiderando o primeiro trecho de, aproximadamente, 100 m de aprendizagem para conhecimento dos parâmetros e resposta da máquina, o shield EPB apresentou um bom desempenho com produções médias da ordem de 20 m por dia e recorde de montagem de 24 anéis em um dia (36 m/dia). A figura, a seguir, apresenta o gráfico de produção média ao longo da Linha 4 – Amarela do Metrô de São Paulo.



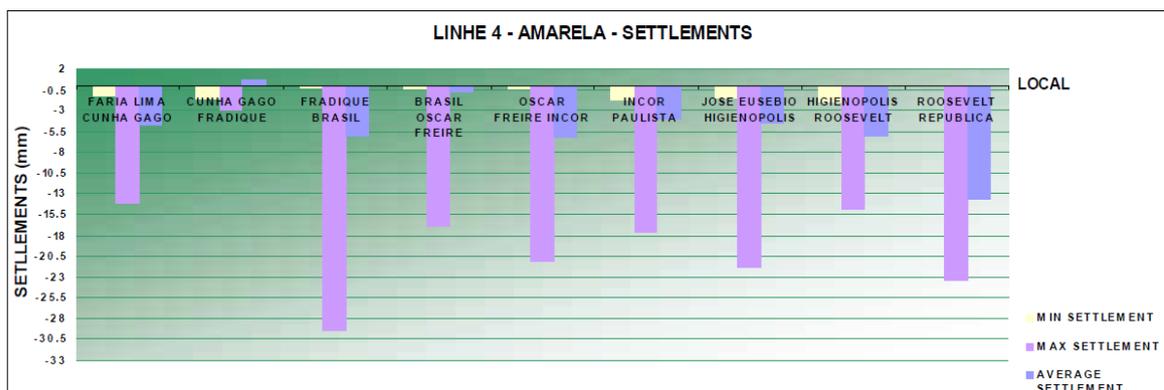
Média de produção apurada na máquina tuneladora da Linha 4 – Amarela
(Harada et. al, 2009)



c) Recalques

Os recalques médios ficaram abaixo de 10 mm, e o máximo por trecho não ultrapassou 20 mm. Somente no trecho entre a Estação Fradique Coutinho e o Poço VSE Brasil, foram registrados dois locais com 30 mm de recalque máximo, onde o shield EPB passou a meio metro de uma camada espessa de aluvião com 12,80 m de espessura.

A figura, a seguir, apresenta os recalques decorrentes da escavação do túnel em shield da Linha 4 – Amarela.



Recalques observados na escavação do túnel em shield da Linha 4 - Amarela

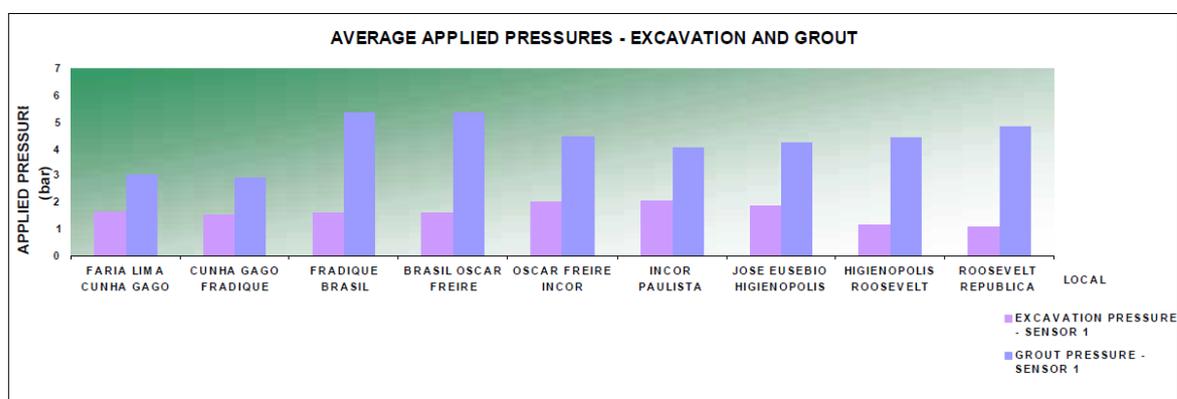
d) Pressão de frente

A pressão de frente utilizada foi sempre a pressão média recomendada, sendo que apenas nas passagens sob edifícios de maior importância foram utilizadas pressões mais altas.

A figura, a seguir, apresenta as pressões médias do sensor 1 (próximo à geratriz superior), utilizadas em cada trecho, que variou de 1,5 a 2 bars, raramente chegando a 3 bars.



Na mesma figura, verifica-se que as pressões utilizadas para injeções nos anéis sempre foram maiores que a recomendadas pelas normas usuais. A Construtora utilizou como premissa o preenchimento do volume teórico, parando apenas quando a calda começava a entrar pela frente do shield EPB.



Pressões de frente e de grout observadas nas escavações da máquina tuneladora da Linha 4 – Amarela

e) Torque

Os torques utilizados foram menores em relação à previsão de torque máximo (26 MN.m), conforme dados apresentados na tabela, a seguir.

Dados Operacionais Registrados na Máquina Tuneladora da Linha 4 – Amarela

Trecho	Empuxo Estimado (kN)	Máximo Torque (MN.m)	a (kN/m ²)	Cobertura Máxima (m)	Tipo de Solo	SPT Médio
1 Faria Lima - Fradique Coutinho	32.843	17,01	20,09	13	4Ar3/ 4Ag1	43,5
2 Fradique Coutinho - Oscar	48.749	16,18	19,11	16	4Ag1	27,2
3 Oscar Freire - Paulista	43.912	16,93	20,00	40	3Ar1	23,75
4 José Eusébio - Higienópolis	40.471	15,50	18,31	30	3Ag1	14,4
5 Higienópolis - República	30.399	14,30	16,89	21	3Ar1	19,9
6 República - Luz	56.649	18,00	21,26	24	4Ar3	32,75



O coeficiente a da tabela anterior refere-se à fórmula empírica de Krause, Th. (1987, apud Maidlet al, 1996) para a estimativa do torque $T = a.D^3$, onde D é o diâmetro da máquina em metros.

f) Anéis de revestimento

Um resumo da especificação dos anéis utilizados na Linha 4 - Amarela, está apresentada a seguir:

- Tipo.....anéis universais trapezoidais;
- Segmentação.....7+1 chave + invert;
- Diâmetro interno.....8,43 m;
- Espessura.....35 cm;
- Largura.....1,5 m;
- Concreto fck.....45 MPa;
- Fibra de aço.....consumo de 40 kg/m³;
- Fôrma.....metálica usinada;
- Cura.....a vapor (túnel de cura);
- Armazenagem.....pilha de segmentos de um anel e invert;
- Utilização.....após 28 dias de cura;
- Ligação radial.....parafusos de 32 mm de diâmetro;
- Ligação longitudinal.....parafusos de 32 mm de diâmetro;
- Controle de infiltração.....gaxeta elastomérica colada;
- Pad de contato.....madeira compensada de 3 mm;
- Projeto.....Halcrow Inc.



3.2.3.4. Método Construtivo

Está apresentada, a seguir, a caracterização da máquina de abertura do túnel do metrô.

a) Partes de uma máquina tuneladora

As máquinas tuneladoras modernas são equipamentos que têm tido rápido desenvolvimento tecnológico nos últimos anos, a ponto de tornar a opção em túnel uma solução mais segura e econômica para a criação de espaços subterrâneos.

São equipamentos que contam com toda uma infraestrutura própria, composta não somente pela tuneladora em si, como também por trailers de apoio, esteiras para retirada de material escavado, locomotivas para transporte de material e segmentos, além de toda uma infraestrutura própria de canteiro, como silos para estocagem de material, contêineres, subestações, eventualmente poços artesianos, estações de efluentes e outros.

Importante destacar que toda essa infraestrutura é vital para o funcionamento da máquina e que qualquer falha em um ou em parte dela poderá resultar na interrupção da operação do tuneladora.

Recomendações usuais falam em áreas mínimas da ordem de 5.000 m² para a montagem e instalação da infraestrutura de apoio, fora a área necessária para a montagem do equipamento em si, que pode chegar a 120 m de extensão, como apresentado na figura a seguir.



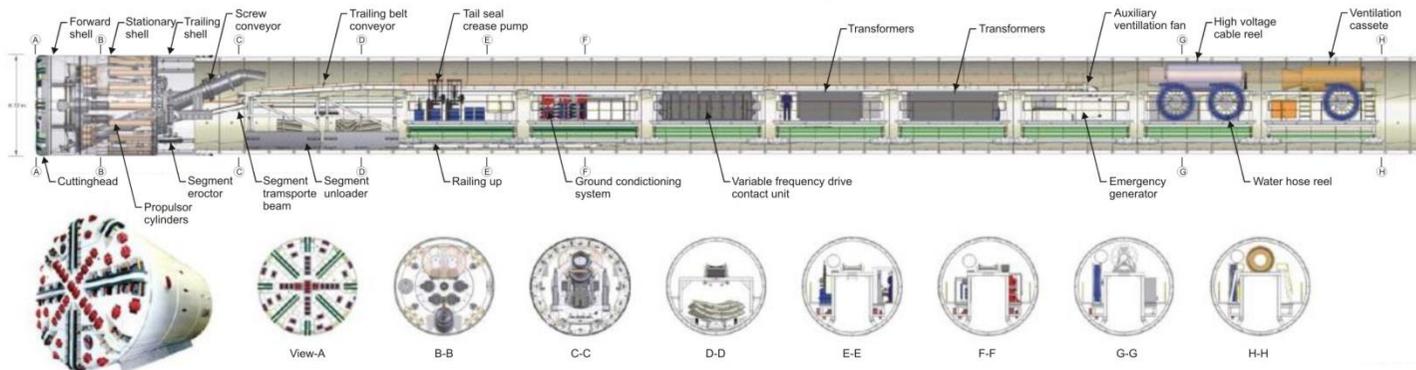
Prefeitura Municipal de Curitiba

Secretaria Municipal de
Planejamento e Administração

Rua Solimões, 160
Fone: 3350-9022
80.510.140
São Francisco
Curitiba - PR
www.curitiba.pr.gov.br

Componentes de uma máquina tuneladora (adaptado de Transit Toronto, 2010)

LOVAT TBM Model RME241SE

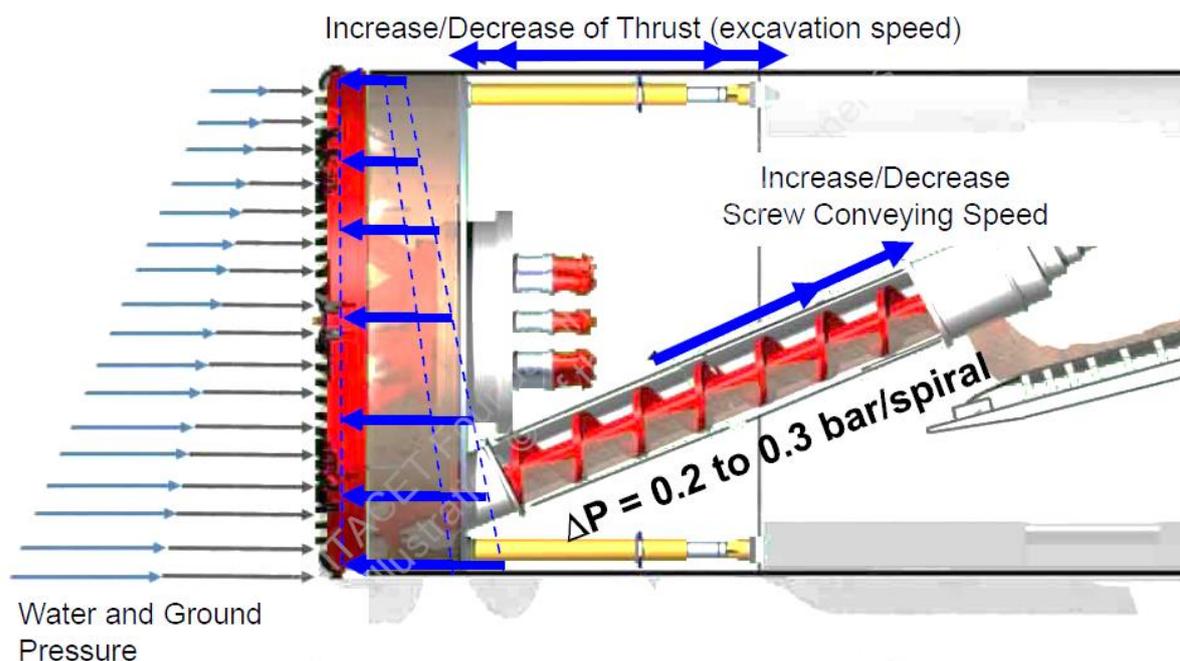


b) Shield EPB (earth pressure balanced)

A máquina tuneladora do tipo EPB baseia-se no princípio de que o próprio material escavado, que preenche a antecâmara, auxilia no suporte da frente de escavação.

Para que isso aconteça, a velocidade de retirada do material escavado, armazenado atrás do disco de corte, deve ser equivalente à velocidade de avanço da máquina. O material escavado é pressionado contra a frente de escavação, equilibrando a pressão total de solo. Há a possibilidade de se balancear a pressão neutra com a injeção de lama, água ou ar sob pressão.

Pela mistura do solo escavado com os aditivos, tem-se uma pasta de consistência quase homogênea que contrabalança as pressões de frente. A figura, a seguir, apresenta um esquema do contrabalanceamento das pressões de frente pelo material escavado.



Contrabalanceamento das pressões de frente através da pasta formada (adaptado de Thewes, 2013)



A espessa consistência do solo escavado na forma de uma pasta (comparado à lama do slurry shield) solicita um elevado torque na cabeça de corte (cerca de 2,5 vezes maior que o slurry shield).

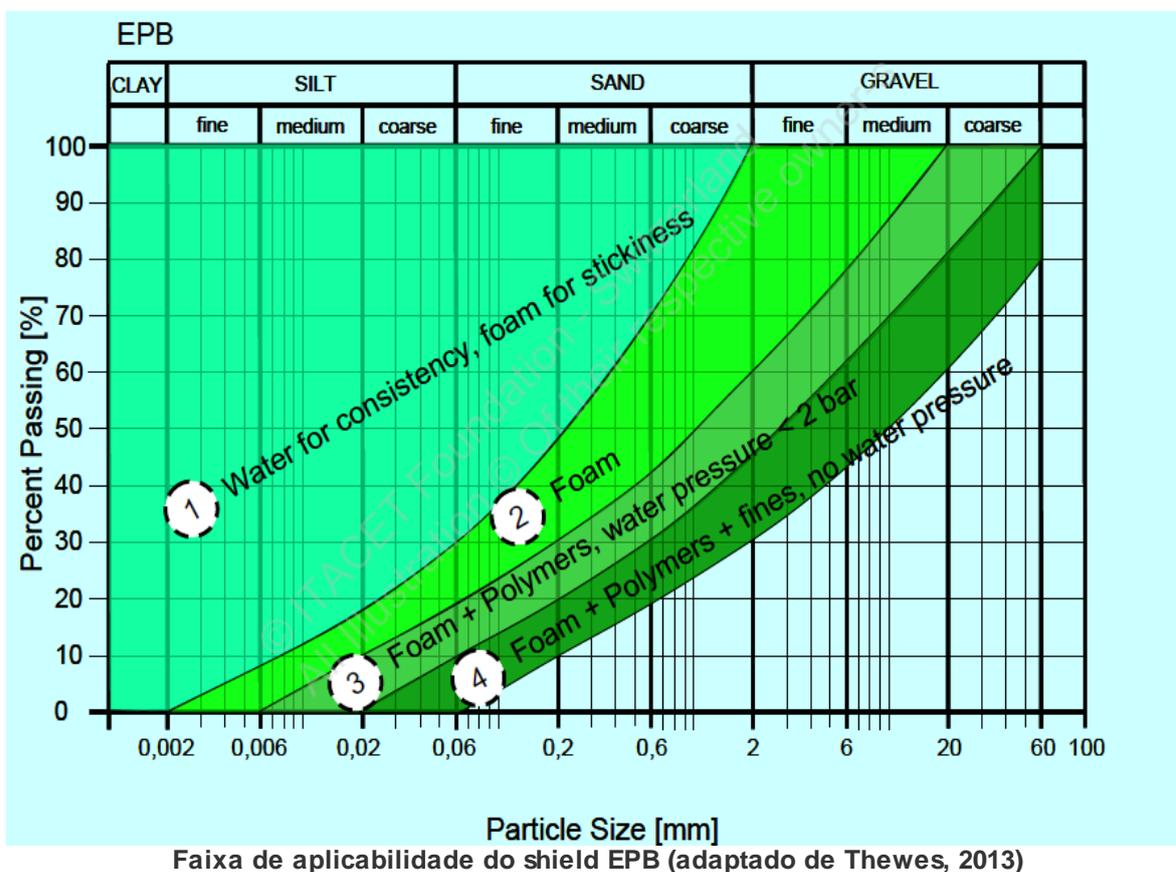
O controle da pressão de frente é obtido ajustando-se os seguintes parâmetros:

- Velocidade de rotação da cabeça de corte: 2 a 3 rotações por minuto;
- Velocidade de rotação do parafuso sem fim: até 24 rotações por minuto;
- Avanço do shield por macacos hidráulicos.

Devido à compressibilidade da pasta e da distribuição não-hidrostática da pressão na câmara, o controle da pressão não é muito preciso, oscilando 0,5 bar para mais ou para menos.

A pasta possuirá uma porcentagem de 50 a 70% de sólidos, permitindo a sua retirada com esteira rolante e caminhões. Em geral, a sua trabalhabilidade poderá ser facilmente assegurada, desde que a quantidade de bentonita adicionada não seja muito grande.

O limite de aplicação do shield EPB é definido pela permeabilidade do solo e pela pressão hidrostática. Como regra empírica, a figura, a seguir, apresenta os limites de granulometria do solo para os quais o EPB é aplicável, conforme sugerido por Thewes (2013).



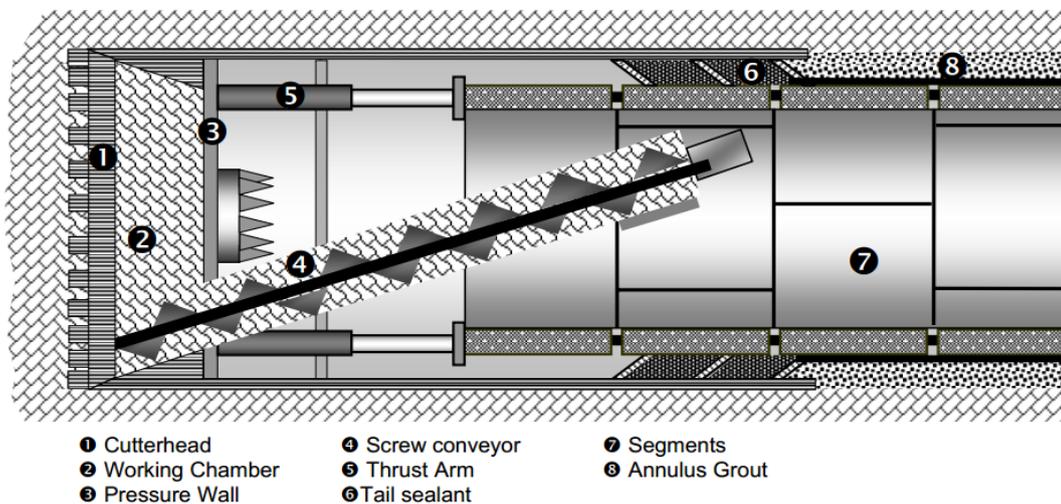
Para solos mais finos (porcentagem de fino >30% ou região 1 da figura anterior), o EPB é aplicável em qualquer situação. Para areias (regiões 2 e 3 da figura Water and Ground Pressure), o EPB é aplicável desde que sua permeabilidade não exceda 10-3 cm/s para uma pressão hidrostática de 2 atm. Essa faixa compreende solos com porcentagem de finos entre 15 a 30%, sendo necessário algum condicionamento do solo escavado com aditivos poliméricos formadores de espumas.

Na região 4 da figura anterior, o EPB não deve ser empregado em locais com pressão d'água, sendo necessário um grande condicionamento do solo escavado com aditivos poliméricos. Abaixo da região 4 da citada figura, a permeabilidade do solo é muito alta, não sendo recomendado o uso do shield EPB.



Importante destacar que é usual injetar-se bentonita, polímeros, espumas químicas, polpas ou água na face de escavação de um shield EPB, elementos estabilizadores que também facilitam a remoção de solo e seu transporte subsequente.

A figura, a seguir, apresenta as principais partes de um equipamento do tipo EPB de forma esquemática.



Principais partes de uma tuneladora do tipo EPB (adaptado de EFNARC, 2005)

O empuxo aplicado nos anéis pelos cilindros de empuxo para impulsionar a máquina para frente (parte 5) resulta em uma pressão no material escavado situado na antecâmara da máquina (parte 2).

Quando essa aplicação em contraposição ao alívio de tensões dos métodos convencionais for superior ao empuxo do maciço, o equipamento poderá provocar soerguimentos da superfície ao invés dos usuais recalques.

Por outro lado, se o fluxo de solo escavado (parte 4) for mais elevado que o necessário para manter as tensões de repouso no solo, ocorrerá alívio de tensões e consequentes recalques.



A figura, a seguir, apresenta uma imagem de um típico equipamento do tipo EPB.

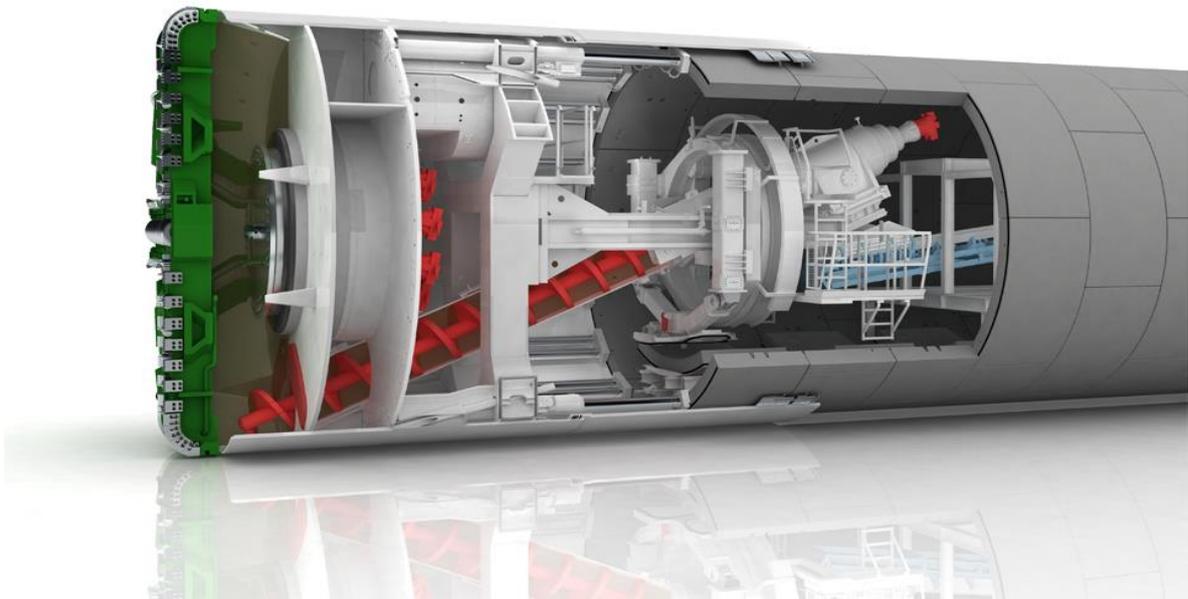
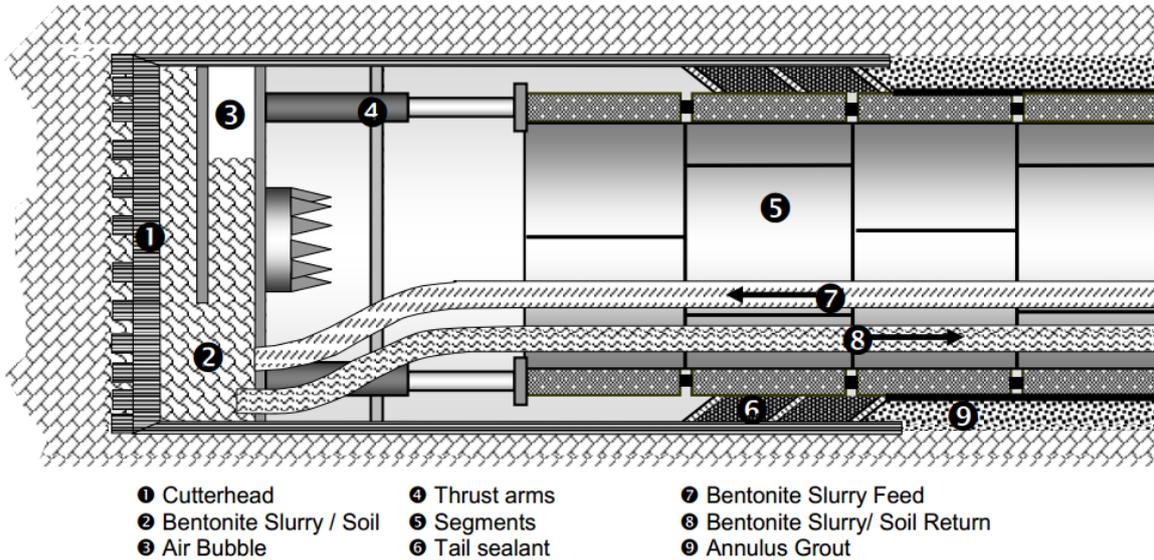


Imagem de um típico equipamento do tipo EPB (adaptado de Herrenknecht, 2013)

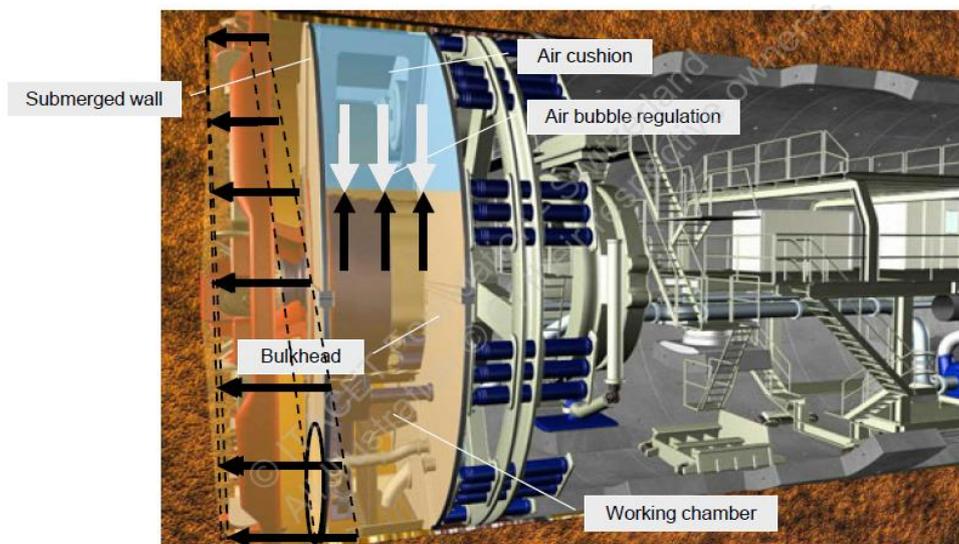
c) Slurry shield

Para esse shield de frente fechada, injeta-se uma mistura de bentonita e água para suportar a frente de escavação. A mistura (slurry) é bombeada para dentro de uma câmara fechada localizada atrás do disco de corte e, mantida sob pressão com o auxílio da aplicação de ar comprimido, pressurizando assim a face de escavação. A figura, a seguir, apresenta partes de um shield slurry.



Principais partes de uma tuneladora do tipo slurry (adaptado de EFNARC, 2005)

A mistura de bentonita, em contato com o solo, forma uma película de gel impermeável (cake), e evita o fluxo da mistura pelo solo adiante da face, mantendo-se assim a pressão aplicada e balanceando a pressão total (efetiva mais neutra). Simultaneamente, o material escavado é misturado com a bentonita e transportado hidraulicamente da câmara frontal de pressão para a superfície.

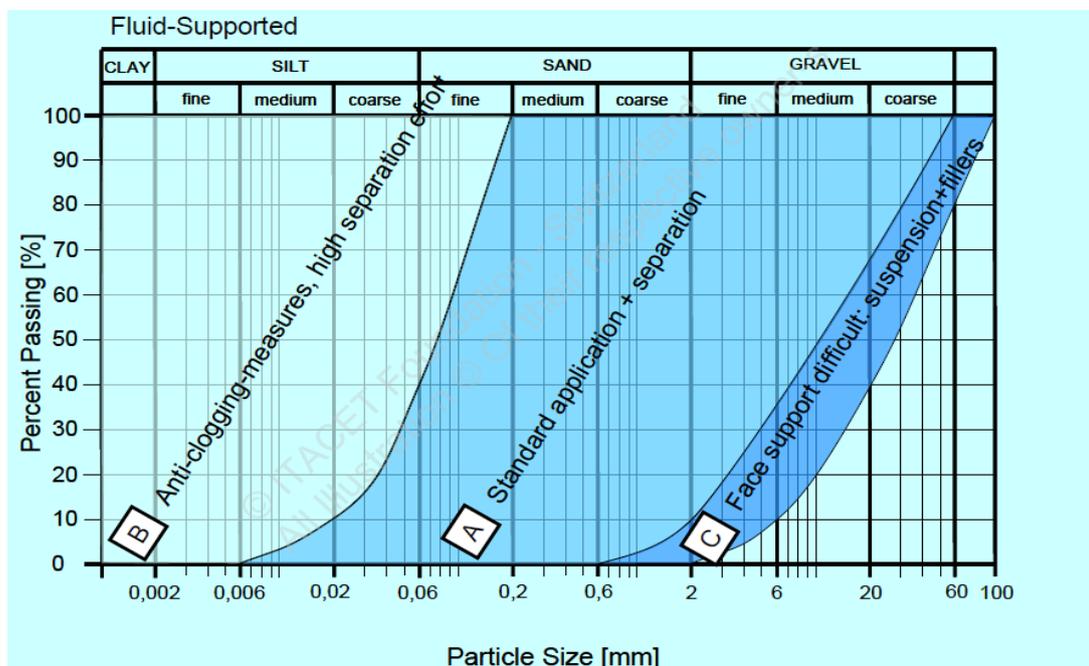


Esquema de funcionamento de um shield slurry (adaptado de Thewes, 2013)



A mistura de bentonita é dimensionada em função da textura e da permeabilidade do solo que será suportado. A principal desvantagem do slurry shield é a necessidade de instalações de grande porte na superfície, destinada à mistura da suspensão bentonita-água e separação do material escavado, exigindo áreas livres, muitas vezes, pouco disponíveis ao longo do traçado da linha.

Poderão ocorrer problemas durante a escavação de solos muito argilosos, que é o caso de certos horizontes da Formação Guabirota. A mistura desse material com a pasta pode causar o entupimento (“embuchamento”) do disco de corte do equipamento ou das tubulações de recalque. Portanto, o slurry shield é mais indicado para solos arenosos e de granulometria mais grosseira, onde o shield EPB pode apresentar dificuldades. A figura, a seguir, apresenta a faixa de granulométrica de aplicação do slurry shield.



Faixa de aplicabilidade de um slurry shield (adaptado de Thewes, 2013)

A figura, a seguir, apresenta uma típica imagem de um equipamento tipo slurry.

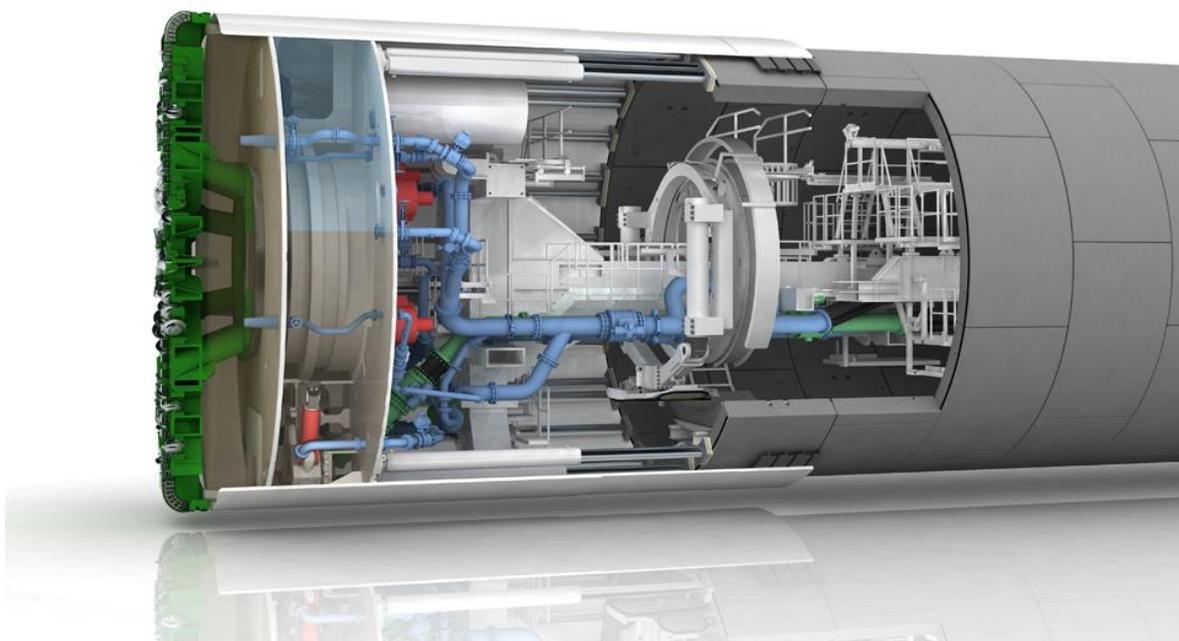


Imagem típica de um slurry shield (adaptado de Herrenknecht, 2013)

d) Escolha do equipamento apropriado

A escolha do melhor equipamento estará calcada na composição granulométrica do maciço escavado e principalmente nas pressões de trabalho. As informações geológicas atualmente disponíveis não nos permite avaliar com precisão qual a faixa de distribuição granulométrica dos solos escavados.

No entanto, conforme apresentado por Boszczowski e Ligocki (2013), a profundidade dos solos residuais na Bacia Sedimentar de Curitiba varia, aproximadamente de 4 a 20m, com média de 12m. Abaixo dela, é usual ocorrer uma faixa de, aproximadamente, 2,5m de espessura de rocha alterada mole.

Conforme apresentado, tais materiais tendem a se apresentar como siltes arenosos ou areias siltosas nas porções próximas ao topo do perfil de intemperismo, ao passo que



Prefeitura Municipal de Curitiba

Secretaria Municipal de
Planejamento e Administração

Rua Solimões, 160
Fone: 3350-9022
80.510.140
São Francisco
Curitiba – PR
www.curitiba.pr.gov.br

nas camadas intermediárias desse perfil é comum a ocorrência de argilas siltosas com areia em menor proporção. Em solos oriundos de diabásio, os solos residuais são mais argilosos pelo fato da rocha matriz ser desprovida de minerais de quartzo.

Portanto, com relativa segurança, é possível inferir a predominância de solos argilosos ou siltosos na frente de escavação do equipamento, com pressões efetivas na frente de escavação em torno de 3 bar (300 kPa).

Com relação às pressões hidrostáticas, pode-se estimar com relativa segurança o nível d'água entre 2 e 3 m de profundidade. Como o eixo da máquina tuneladora deve ocorrer em torno dos 15 m de profundidade, as pressões hidrostáticas máximas girarão em torno de 3 bar.

Portanto, um equipamento do tipo EPB parece ser o mais apropriado para as escavações do túnel de via. No entanto, a opção em slurry será avaliada em função dos resultados de uma campanha de investigação geológica que considere o eixo do equipamento em cota mais abaixo da atual.

Em ambos os casos, o equipamento estará preparado para pressões de frente de até 5 bar, embora possam existir eventualmente picos de pressões de até 6 bar.



3.2.3.5. Parâmetros Operacionais

Estão apresentados, a seguir, os cálculos teóricos que justificam os parâmetros adotados.

a) Preâmbulo

A determinação dos parâmetros operacionais para o shield EPB confunde-se com o cálculo de estabilidade da escavação, uma vez que os esforços provenientes do maciço podem e devem ser controlados pela operação de escavação e pressurização da frente.

Para a determinação dos parâmetros operacionais, serão consideradas as seguintes definições de desempenho:

- Pressões máximas da face: são as pressões máximas a serem transmitidas pelo Shield EPB ao maciço, correspondentes às tensões horizontais totais “in-situ” (em repouso). Tais pressões são associadas, teoricamente, à deformação nula do maciço, evitando-se movimentações de caráter passivo. São definidas na cota do eixo do túnel;
- Pressões mínimas de face: são as pressões mínimas a serem aplicadas à face, necessária para que não seja alcançada a condição de ruptura global ou local do maciço. Tais pressões também devem limitar os recalques que correspondam à condição limiar de instabilidade e às distorções máximas superficiais associáveis à indução de danos em estruturas. São definidas para o eixo do túnel;
- Pressões de grout: são as mínimas e máximas pressões necessárias à injeção de groutamento na saia da máquina tuneladora que impedem o fluxo de materiais para o interior da máquina ou a saída dele para a frente de escavação, respectivamente. Em geral, costumam ser especificadas como as pressões de frente acrescidas das perdas de carga entre a frente e a saída.

b) Embasamento teórico necessário



Como o próprio nome sugere, a estabilidade da frente em um shield EPB é garantida pelo controle da pressão de solo existente na câmara situada na parte frontal do equipamento, logo atrás do disco de corte responsável por fazer a escavação, propriamente dita, do maciço. A “lama” existente na câmara é constituída pelo próprio material recém-escavado, misturado com aditivos que são adicionados ao maciço pelo disco de corte.

A avaliação da pressão de frente para reduzir a níveis aceitáveis os efeitos da escavação (recalques e deslocamentos) é um processo complexo, que será considerado a partir de diferentes formas de análise. Algumas formas de análise são descritas por Guglielmetti V. et al (2007).

Dentre as comumente empregadas, são citadas:

- Método de Anagnostou-Kovari (LEM “Limit Equilibrium Method”);
- Método de Caquot-Kerisel (“Lower and Upper Bounds Theorems of Plasticity Method”);
- Teoria de Rankine: Tensões efetivas do solo no estado em repouso (K_0) e ativado (K_a).

Aos resultados obtidos, são acrescentadas as ponderações sobre as tensões hidrostáticas na frente de escavação.

Além das pressões de referência para os trabalhos de escavação, são apresentadas valores de pressões de referência a serem exercidas em eventuais trabalhos de vistoria e manutenção do disco de corte e/ou da parte frontal do shield, quando em operação hiperbárica.

Em termos de considerações de cálculo, foi estimado em 14 kN/m^3 o peso específico da mistura solo escavado, espuma e/ou outros aditivos. Foram consideradas seções de

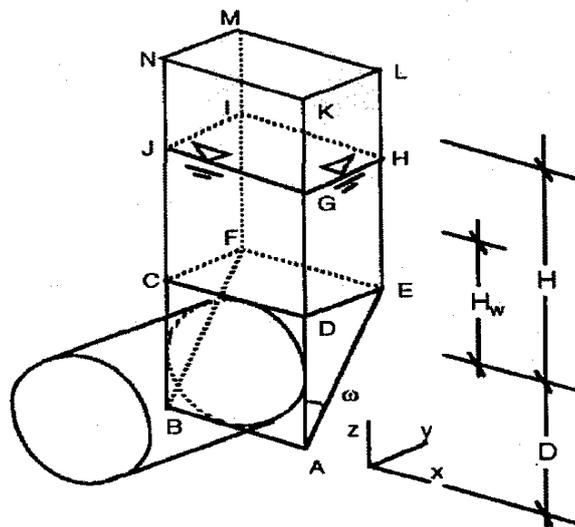


referência as distâncias de, aproximadamente, 100 m. Os cálculos consideram condições não drenadas e critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Os cálculos, aqui apresentados, visam apenas estimar as pressões de frente necessárias para que sejam evitadas rupturas do maciço; mais precisamente, para que sejam evitadas possíveis formações dos mecanismos do colapso da face do túnel. A metodologia empregada não avalia os recalques induzidos pela escavação do túnel.

b.1) Método de cálculo de estabilidade de Anagnostou & Kovari (1996)

Os cálculos foram realizados de acordo com a metodologia proposta por Anagnostou e Kovari (1996). O cálculo pressupõe a formação de uma cunha de ruptura junto à face do túnel. O carregamento da cunha é baseado na teoria de silo de Janssen (1895). A figura, a seguir, ilustra a cunha considerada nos cálculos:



Cunha de ruptura junto à face do túnel considerada por Anagnostou e Kovari (1996)

De acordo com a teoria de Anagnostou e Kovari a pressão efetiva junto à geratriz inferior pode ser calculada como segue:

$$\sigma' = F0 \cdot \gamma' \cdot D - F1 \cdot c' + F2 \cdot \gamma' \cdot \Delta h - F3 \cdot c' \cdot (\Delta h / D)$$



Onde:

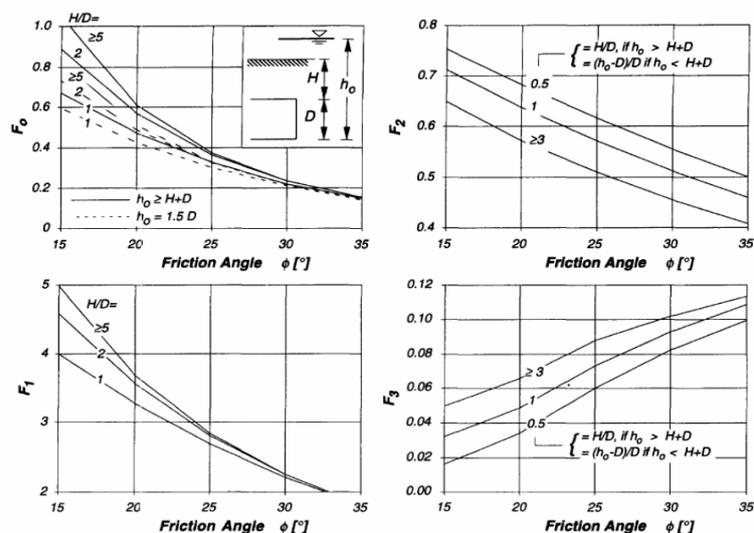
- σ' = Pressão efetiva medida na base do túnel;
- $\Delta h = h_0 - h_f$;
- h_0 = Nível freático registrado pelo piezômetro (a partir da base do túnel);
- h_f = Nível piezométrico na câmara de escavação (a partir da base do túnel);
- H = Cobertura acima da abobada do túnel;
- D = Diâmetro da cabeça de corte;
- γ_s = Peso específico saturado do material “in situ”;
- γ' = Peso específico submerso do material “in situ”;
- γ_w = Peso específico da água;
- c' = Coesão efetiva;
- ϕ' = Ângulo de fricção efetivo;
- F_0, F_1, F_2 e F_3 = Coeficientes adimensionais.

Baseado na Lei de Terzaghi, a pressão total junto à geratriz inferior pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$\sigma_{tot} = \sigma' + h_f \cdot \gamma_w$$



Os coeficientes F_0 , F_1 , F_2 e F_3 são obtidos através dos ábacos da figura, a seguir:



Ábacos utilizados no método de Anagnostou e Kovari (1996)

b.2) Método de cálculo de estabilidade de Caquot & Kerisel (1956) modificado por Carranza Torres (2004)

O método é baseado no teorema de plasticidade derivada de análises numéricas bidimensionais de túneis circulares, e que pode ser facilmente estendido para geometrias esféricas (tridimensionais). O método de Caquot & Kerisel (1956) modificado por Carranza Torres (2004) considera o equilíbrio imediatamente antes da mobilização da ruptura em torno do túnel.

Nas considerações de cálculo, o material tem um peso específico γ_a e a resistência de corte definido com critério Mohr Coulomb (c', ϕ'). A distribuição de pressão vertical antes da escavação é litostática, com uma razão entre as tensões horizontais e verticais considerando $K_0=1$.

A pressão p_s é aplicada internamente no túnel, e q_s é a sobrecarga aplicada na superfície para ter em conta a carga externa.



No presente caso, a solução Caquot & Kerisel (1956) modificado por Carranza Torres (2004) será empregada de modo a definir o valor da pressão para alcançar um dado valor do fator de segurança (FS). O fator de segurança é definido como uma proporção de parâmetros de resistência de Mohr Coulomb contra parâmetros estimados de ruptura, como pode ser observado na equação:

$$FS = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{\tan(\varphi)}{\tan(\varphi_{cr})}$$

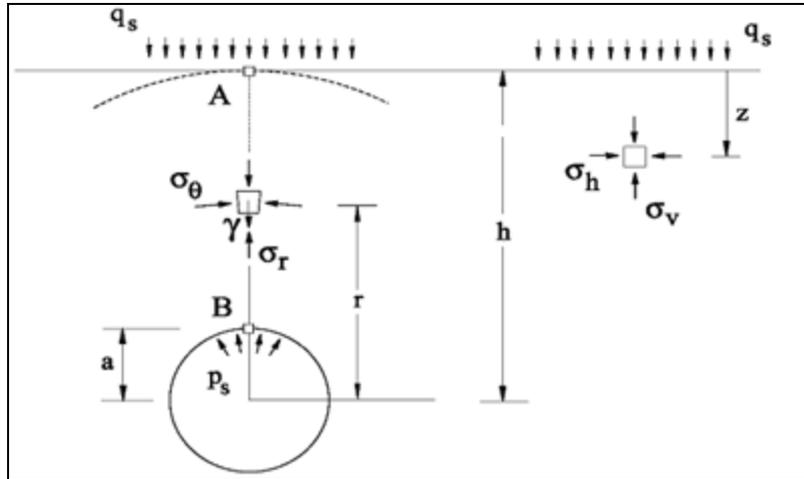
No presente estudo, será assumido um fator de segurança igual a 2,0.

A solução geral de Caquot & Kerisel (1956), modificada por Carranza Torres (2004) para a condição drenada, pode ser então representada pela seguinte equação:

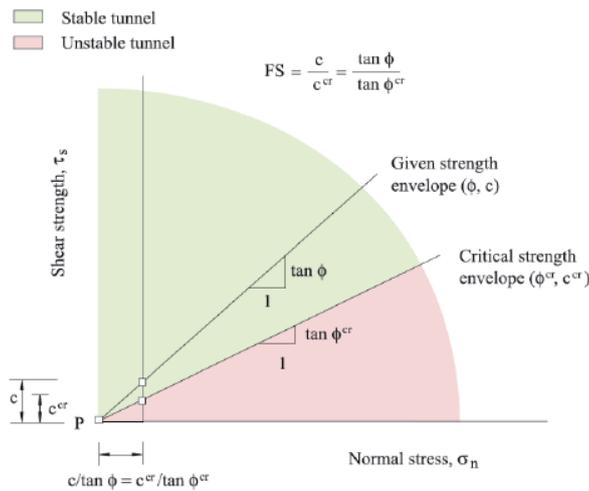
$$\frac{p_s}{\gamma a} = \left(\frac{q_s}{\gamma a} + \frac{c}{\gamma a \tan \varphi} \right) \left(\frac{h}{a} \right)^{-k(N_\varphi - 1)} - \frac{1}{k(N_\varphi - 1) - 1} \left[\left(\frac{h}{a} \right)^{1 - k(N_\varphi - 1)} - 1 \right] - \frac{c}{\gamma a \tan \varphi}$$

Onde:

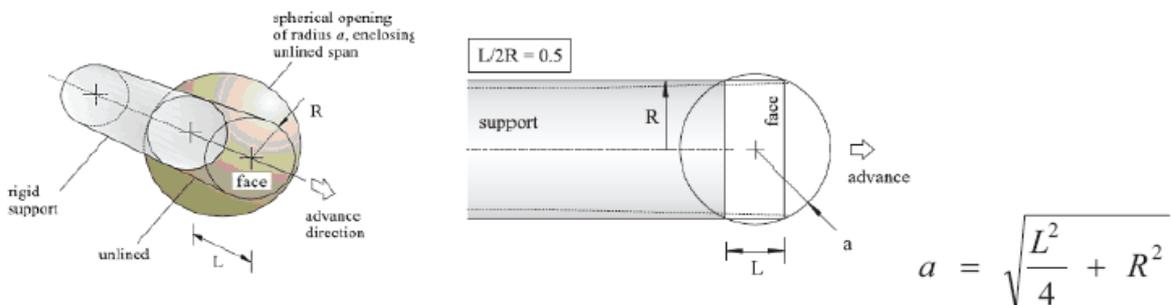
- a = raio do túnel;
- h = profundidade do eixo do túnel;
- k = parâmetro que depende do tipo de escavação, sendo:
 - [1 = túnel de cavidade cilíndrica, 2 = esférica].
- γa = peso específico do material;
- c, ϕ = resistência de corte definido com critério Mohr Coulomb;
- $N_\varphi = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}$ = coeficiente de atrito.



Esquema do Método Caquot & Kerisel (1956), modificado por Carranza Torres (2004)



Zonas de segurança consideradas no modelo de Caquot & Kerisel (1956) modificado por Carranza Torres (2004)



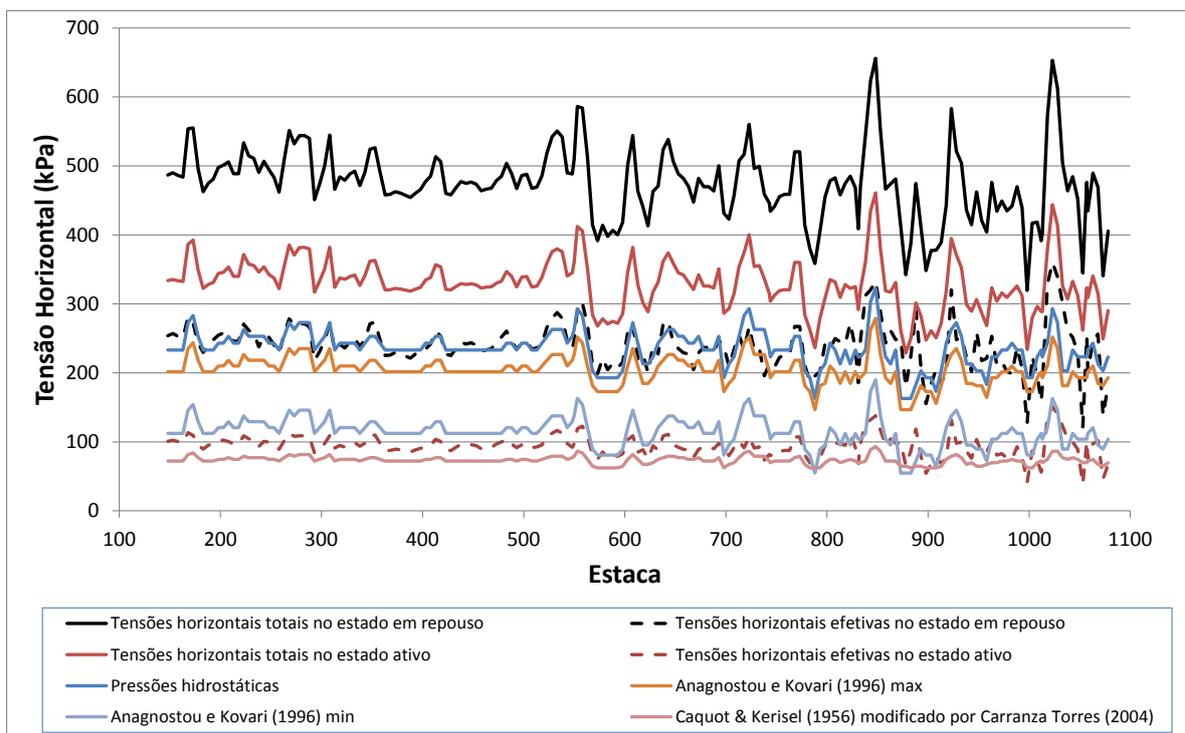
Considerações de cálculo assumidas no modelo de Caquot & Kerisel (1956) modificado por Carranza Torres (2004)



b.3) Resultados

A figura, a seguir, apresenta os resultados das análises. Conforme pode ser observado, as máximas pressões de frente que não alteram o estado de tensões do maciço e que equilibram as pressões hidrostáticas giram em torno de 500 kPa (5 bar) com picos de pressão que podem chegar a 600 kPa (6 bar).

Da mesma forma, observa-se que as mínimas pressões que poderiam ser aplicadas na face de escavação giram em torno de 100 kPa (1 bar). No entanto, essas pressões devem ser consideradas como as tensões no instante da mobilização da instabilização da frente e, portanto, devem ser evitadas.



Estimativas das pressões máximas e mínimas da face do túnel de via



Portanto, verifica-se que as pressões normais de trabalho devem situar-se entre 400 kPa e 500 kPa (4 a 5 bar). No entanto, as mesmas serão ajustadas quando da definição do traçado geométrico.

Em termos de pressões hiperbáricas de trabalho para manutenção da frente, estima-se que as mesmas serão situadas entre 1,5 e 2 vezes as pressões mínimas verificadas, ou seja, entre 150 kPa e 200 kPa (1,5 bar e 2 bar).

c) Estimativa de recalques

A distribuição dos recalques superficiais transversais usualmente é representada por uma curva de distribuição normal (curva de Gauss) invertida. De acordo com essa hipótese, os recalques superficiais transversais podem ser descritos pela função.

$$\rho(x) = \rho_{\text{Máx}} \cdot e^{\left(\frac{-x^2}{2 \cdot ix^2}\right)}$$

Sendo $\rho(x)$ o recalque em qualquer ponto da curva à distância x do eixo de simetria do túnel, $\rho_{\text{Máx}}$, o recalque máximo no eixo de simetria e ix o valor de x correspondente ao ponto de inflexão da curva, no qual ocorre a máxima distorção angular ($\beta_{\text{Máx}}$).

A distorção angular transversal (β) pode ser calculada pela derivada da equação anterior:

$$\beta = \frac{\partial \rho(x)}{\partial x} = \rho_{\text{Máx}} \cdot \left(\frac{-x}{ix^2}\right) \cdot e^{\left(\frac{-x^2}{2 \cdot ix^2}\right)}$$



A máxima distorção angular ($\beta_{\text{máx}}$) pode ser calculada em $X = -ix'$ conforme:

$$\beta_{\text{máx}} = \frac{\rho_{\text{máx}}}{ix} \cdot e^{\left(\frac{-1}{2}\right)}$$

A largura da bacia de recalques transversais pode ser considerada como:

$$L = 2,5 \cdot ix$$

Integrando-se a curva de Gauss, obtém-se a área da bacia de recalques transversais (volume por unidade de comprimento do túnel):

$$V = \int \rho(x) \cdot dx = \sqrt{2\pi} \cdot ix \cdot \rho_{\text{máx}}$$

Define-se como perda de solo o volume escavado além do limite teórico de escavação, devido às deformações de convergência da face e das paredes do túnel. O volume de perda de solo é uma área por unidade de comprimento do túnel, podendo ser expresso como uma porcentagem de área de escavação.

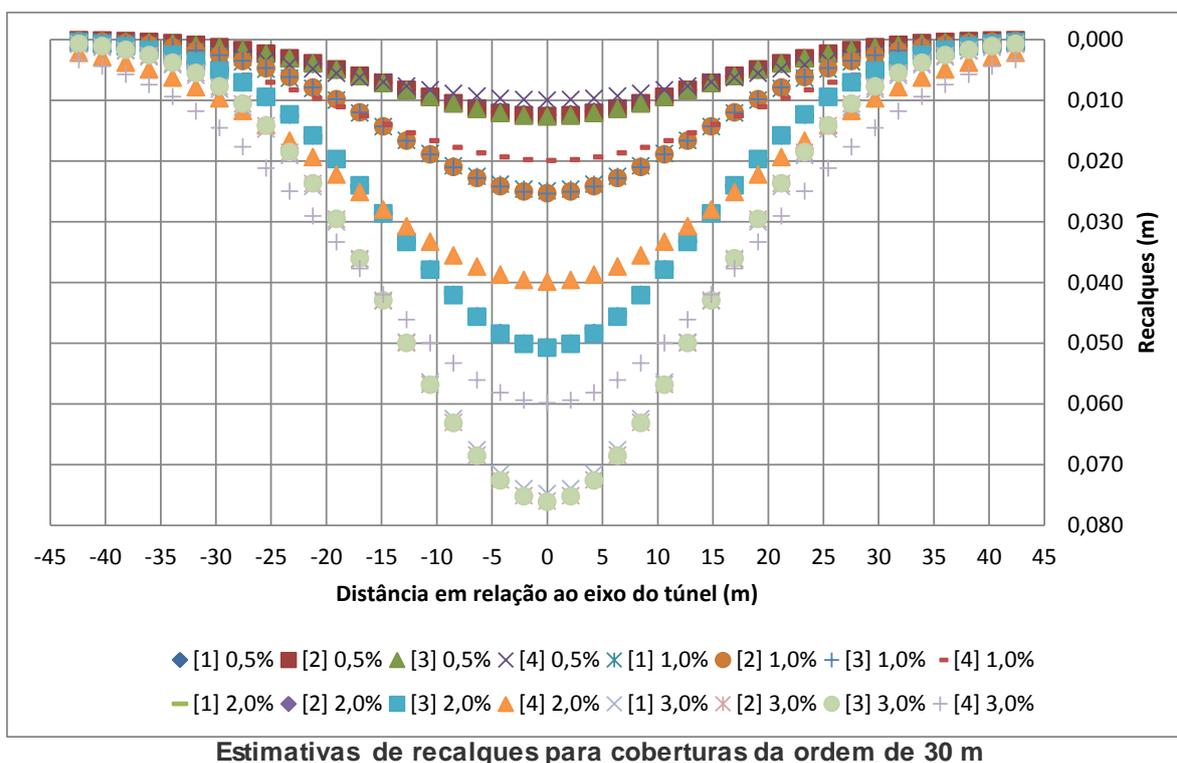
No presente estudo, foram consideradas perdas de solo de 0,5, 1, 2 e 3%. Perdas de solo de 0,5 e 1% correspondem a recalques em condições normais de escavação. Perdas de solo de 2 e 3% podem estar associadas a escavações com difíceis controles de pressão pela frente ou pela saída da máquina.

As estimativas de recalque foram realizadas considerando as observações de [1] Peck (1969) e Schmidt (1969), [2] Atkinson e Potts (1977), [3] O'Reilly e New (1982), e [4] Mair e Taylor (1997).



A figura, a seguir, apresenta uma estimativa de recalques para as condições de máxima cobertura. Conforme pode ser observado, os recalques máximos são da ordem de 80 mm em condições anômalas de escavação. Em condições normais de escavação, os máximos recalques estimados são da ordem de 20 mm.

A bacia de recalques deve ter uma semilargura da ordem de 40 m, e uma deflexão máxima de, aproximadamente, 1/1.000 em condições normais de escavação, valor esse que não requer maiores atenções a respeito.

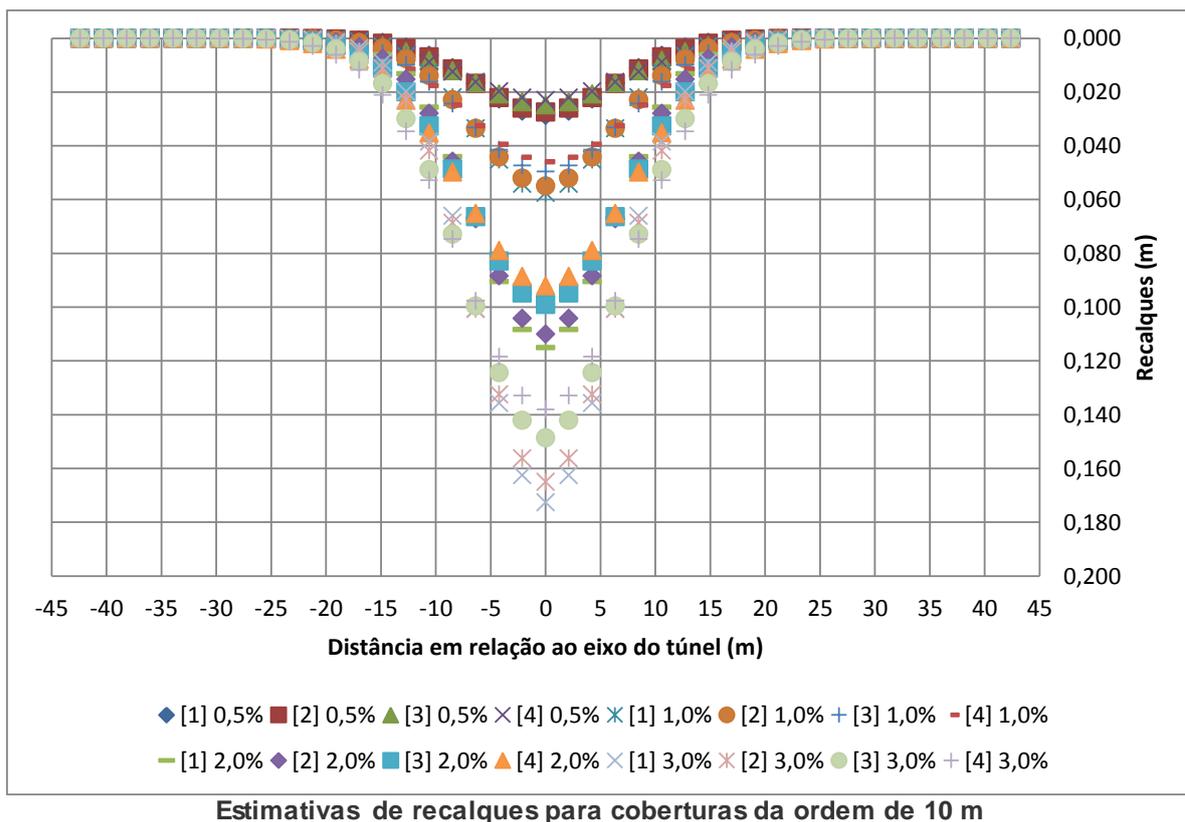


A figura, a seguir, apresenta uma estimativa de recalques para as condições de mínima cobertura. Conforme pode ser observado, os recalques máximos são da ordem de 180 mm em condições anômalas de escavação.



Em condições normais de escavação, os máximos recalques estimados são da ordem de 50 mm. A bacia de recalques se mostra muito mais concentrada, com uma semi-largura da ordem de 25 m, e uma deflexão máxima de, aproximadamente, 1/350 em condições normais de escavação.

Durante o projeto executivo, estruturas lindeiras e redes de utilidades públicas serão avaliadas e tratamentos e/ou revisões no conceito do projeto serão estimados e/ou revistos, como por exemplo, adoção de tratamentos para as escavações e/ou aprofundamento do greide de via.





d) Pressão de injeção do anel

O grout a ser injetado no espaço que se forma entre o anel e o maciço escavado deve ser injetado em pressão que respeita os seguintes limites:

- A pressão de grout será maior do que a pressão hidráulica do maciço (para que ocorra gradiente de pressão e o grout consiga ser injetado);
- A pressão também não poderá ser inferior à pressão da câmara (para evitar que entre material da câmara frontal no espaço anelar).

Tendo em conta esses limites, a pressão de injeção de referência foi definida igual à pressão de frente (no mesmo nível medido) aumentada de 10 KPa.

Vale a pena ressaltar que os valores de pressão a ser injetado serão entendidos como valores mínimos não incluindo as perdas de carga do circuito de injeção. Esses valores serão definidos pelos operadores de TBM.

e) Torques estimados

Considerando um coeficiente α (alfa) igual a 20 kN/m², o mesmo verificado para a máquina tuneladora da Linha 4 – Amarela, pode-se estimar o torque máximo do equipamento como igual a:

$$T = \alpha \cdot D^3 = 20 \times 10,60^3 = 23.820 \text{ kNm} = 23,8 \text{ MN}$$

Considerando um coeficiente de segurança de 1,5, o torque nominal recomendado para o equipamento será de 36 MN.

Para o “break out” do equipamento, isto é, o início da rotação da cabeça de corte parada, será recomendado um torque mínimo de 1,2 vezes o torque nominal. Portanto, será recomendado um torque de 43 MN.



f) Empuxo total estimado

Para possibilitar uma estimativa do empuxo necessária para o shield, serão considerados dois cálculos, apresentados a seguir, um empírico e outro teórico.

f.1) Cálculo empírico (experiência na Linha 4)

$$E = \beta \times D^2 \text{ [em tf]}$$

Onde:

- β = coeficiente teórico obtido com a operação do shield EPB da Linha 4 – Amarela;
- $\beta_{\text{máximo}} = 67$;
- $\beta_{\text{médio}} = 45$;
- $E = 45 \times 10,60^2 = 5.056 \text{ tf} = 50.560 \text{ kN}$.

Considerando o coeficiente de majoração de 2,0, tem-se $E = 101.120 \text{ kN}$.

f.2) Cálculo teórico

- Força devida à pressão de couraça
 - Diâmetro..... $D = 11,0 \text{ m}$;
 - Perímetro $P = 34,60 \text{ m}$;
 - Comprimento do shield..... $L = 11,00 \text{ m}$;
 - Área lateral do shield $S = 380,2 \text{ m}^2$;
 - Coeficiente de atrito aço/lama $\mu = 0,105$;
 - Pressão máxima da lama..... $\rho_{\text{máx}} = 5,00 \text{ bar}$.

Sendo $F1 = S \times \rho_{\text{máx}} \times \mu$, e substituindo tem-se: $F1 = 380,2 \times 500 \times 0,105 = 19.960,5 \text{ kN}$.

- Força devida ao peso do shield



- Coeficiente de atrito (aço/lama) $\mu = 0,105$;
- Peso do shield (aproximado) $G = 1.350 \text{ tf}$.

Sendo $F2 = G \times \mu$, e substituindo tem-se: $F2 = 1.417,50 \text{ kN}$.

- Força suporte da pressão frontal
 - Pressão máxima $\rho_{\text{máx}} = 5,00 \text{ bar}$;
 - Área da face do shield $S = 95,03 \text{ m}^2$.

Sendo $F3 = \rho_{\text{máx}} \times S$, e substituindo tem-se: $F3 = 47.515 \text{ kN}$.

- Força de contato com os bits de corte (escavação em solo)
 - Quantidade de bits de corte $n_f = 202 \text{ un}$;
 - Força necessária por bit $\beta_f = 25 \text{ kN/un}$;
 - Quantidade de discos $n_d = 2 \text{ un}$;
 - Força necessária por disco $\beta_d = 150 \text{ kN/un}$.

Sendo $F4 = n_f \times \beta_f + n_d \times \beta_d$, e substituindo tem-se: $F4 = 5.350,0 \text{ kN}$.

A soma das forças $F1$ resulta em um empuxo de $E = 74.243 \text{ kN}$.

Considerando que a máquina deva ter uma capacidade majorada em 20%, tem-se que a estimativa de empuxo de $E = 89.091,6 \text{ kN}$.



g) Capacidade normal do parafuso sem fim

Em equipamentos do tipo EPB, o parafuso sem fim cumprirá as seguintes exigências:

- Remoção do material da antecâmara, região pressurizada, para o interior do túnel, região em pressão atmosférica;
- Garantir a estanqueidade à água, impedindo o seu acesso ao interior do túnel;
- Controle das pressões de suporte na antecâmara de escavação, através do controle de remoção de material.

Dessa forma, o seu dimensionamento está intimamente vinculado à capacidade de vazão/retirada de material escavado acondicionado, realizado por meio de injeções de bentonita e/ou de aditivos formadores de espuma.

A taxa de injeção de espuma na frente (FIR) varia entre 30 e 80% em areias, e entre 50 e 80% em argilas. Já a taxa de expansão da espuma no material escavado (FER) costuma variar entre 5 e 10 em areias, e entre 2 e 8 em argilas.

Considerando o panorama dos solos da Cidade de Curitiba e as informações disponíveis até o momento, serão considerados parâmetros conservadores.

A taxa de injeção, FIR, será adotada igual a 100% para representar uma necessidade elevada de injeção de espuma na frente. Adicionalmente, será considerada uma taxa de expansão, FER, reduzida e igual a 2,0, para representar uma baixa capacidade de reação do solo local com o aditivo.

O volume de escavação de um anel completo (V) é dado por:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} L = \frac{\pi \times 11,0^2}{4} \times 1,5 = 142,5 \text{ m}^3$$

Considerando um peso específico do solo escavado igual a 20 kN/m³, o peso (P) de material escavado misturado com aditivos será, aproximadamente, igual a:



$$P = Vx (\gamma_{solo} + (FIR/FER)\gamma_{\acute{a}gua}) = 142,5x(20 + (1/2)x10) = 3562,5 \text{ kN}$$

Considerando uma velocidade de avanço do macaco hidráulico igual a 80 mm/minuto, o tempo de avanço desse anel será de:

- $T = 1500 \text{ mm}/(80 \text{ mm/minuto}) = 18,75 \text{ minutos} = 0,3125 \text{ horas}$.

Considerando que a lama que se forma na frente de escavação tenha um peso específico de 14 kN/m³, a capacidade nominal do parafuso sem fim será de:

- $CAP = 3310 / 0,3125 = 10.592 \text{ kN/hora}$;
- $CAP = 814,3 \approx 810 \text{ m}^3/\text{hora}$.

Portanto, o parafuso sem fim estará dimensionado para uma vazão mínima de 815 m³/hora.



3.2.3.6. Partidas e Chegadas do Shield

Estão apresentados, a seguir, os procedimentos executivos de trabalho realizados pelo shield EPB na implantação de um túnel de metrô.

a) Conceitos

Em obras com shield EPB, as etapas de partida e chegada do equipamento em unidades construtivas têm sido motivo de grande preocupação, uma vez que esses momentos concentram grande parte dos acidentes ocorridos em escavações mecanizadas.

Atualmente, dois métodos construtivos são mais utilizados: o tratamento do maciço e a execução de selos de vedação, explanados a seguir.

Para o tratamento do maciço, normalmente são utilizadas colunas de jetgrouting vertical ou horizontal, congelamento, injeção química, dentre outros. O tratamento deve possibilitar a abertura da parede provisória da unidade construtiva, evitando a entrada de solo e de fluxo d'água.

Para as partidas, o shield EPB inicia a escavação com câmara vazia, sem a necessidade de aplicar pressão de frente, uma vez que a estabilidade do maciço é garantida pelo tratamento. Desse modo, o empuxo aplicado pelos macacos hidráulicos é muito reduzido, necessário apenas para vencer o atrito da máquina com o solo, concreto ou aço, possibilitando assim a otimização da estrutura de reação.

O comprimento necessário para o tratamento é determinado de tal modo que, ao alcançar o final da região tratada, a tuneladora comece a operar com câmara cheia e a aplicar pressão de frente mínima, havendo instalado e grouteado ao menos dois anéis de revestimento do túnel de via.



Para as chegadas, as máquinas devem reduzir as pressões de frente de forma gradativa até um valor próximo de zero junto ao revestimento da unidade construtiva. Por isso, o tratamento também é necessário para as chegadas, para que o equipamento possa escavar o maciço sem instabilizá-lo.

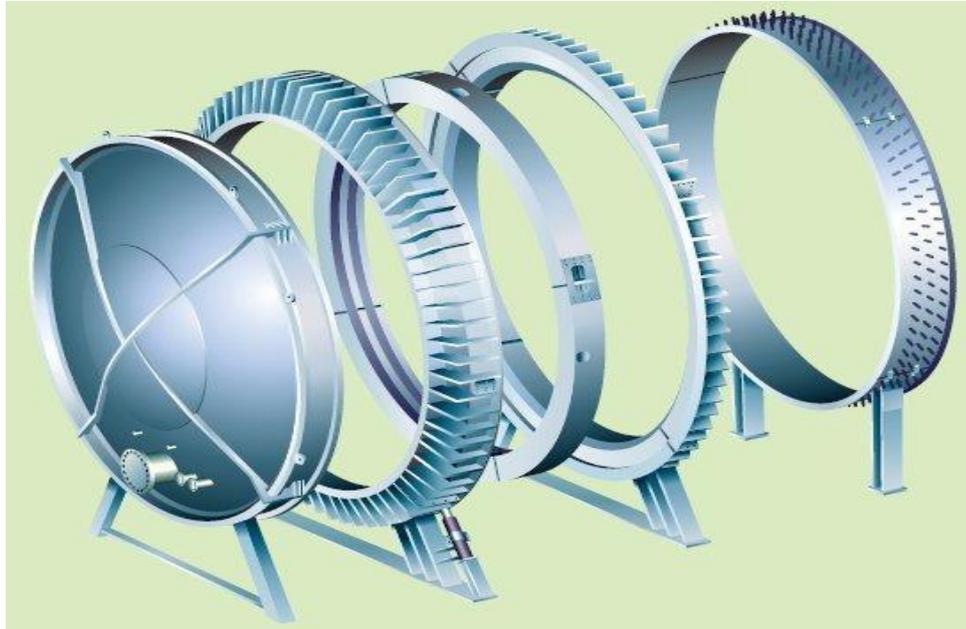
A adoção de selos de vedação (“entrance packing”) para a partida e chegada de tuneladoras tem sido utilizada no Japão e na Europa. O revestimento frontal da unidade construtiva é aberto, sendo nele instalado um selo composto por chapas de neoprene aderidas a uma estrutura metálica anelar.

As chapas de neoprene são ajustáveis, e se conformam ao perímetro da tuneladora conforme esta avança por dentro do selo. Com os selos de vedação, o procedimento operacional de pressurização ou despressurização é similar ao procedimento da solução de tratamentos do maciço para partida e chegada.

Nas partidas, existe a necessidade de um tratamento frontal junto à parede que a máquina irá escavar até preencher a antecâmara. Nenhuma retirada de material é realizada pelo parafuso sem fim nesse instante. Assim que preenchida, a antecâmara é pressurizada, cabendo ao selo de vedação resistir às pressões advindas da frente.

Nas chegadas, existe um selo frontal que permite a despressurização da frente de forma controlada sem que haja fuga de material de preenchimento do espaço anelar pela frente de escavação.

A figura, a seguir, apresenta um esquema de montagem de um selo de vedação de chegada.



Esquema de um selo de vedação para chegada de tuneladoras

São estruturas de custos elevados, mas que podem ser reaproveitadas após a passagem da máquina. A sequência de fotos apresentadas nas figuras, a seguir, ilustra a aplicação de um selo de chegada em uma obra do Metrô de Roma.





Partes da estrutura de um selo de vedação

Na Linha 4 do Metrô de São Paulo, utilizou-se a solução de tratamento frontal com CCPh de 18 m executados a partir da unidade construtiva e um tampão de 3 m de espessura com CCPv. Mostrou ser uma solução segura e de fácil controle. Mesmo com a redução do empuxo ocasionada pela execução dos tratamentos, a estrutura de reação necessária foi grande e de difícil montagem. Acredita-se que a solução de selo teria ocasionado estruturas de reação mais robustas.

Por conta do exposto, recomenda-se utilizar o mesmo conceito de tratamento do maciço nas chegadas e partidas.



b) Tratamentos

O projeto dos tratamentos teve os seus critérios gerais descritos, a seguir, sendo necessário estudo para cada caso particular:

- Em camadas arenosas, deve-se prever colunas de CCPH diâmetro de 50 cm a cada 35 cm com comprimento $l = 18$ m. As colunas devem estar dispostas ao longo de todo o perímetro do túnel. Para as partidas, é desejável uma linha dupla de tratamento na calota superior do túnel e uma linha simples na inferior. Para as chegadas, uma única linha simples, ao longo de toda a seção, é recomendada;
- No caso de camadas argilosas e conseqüente impossibilidade de execução de CCPH, deve-se prever enfilagens de barras de fibra de vidro. Normalmente, empregam-se barras de diâmetro de 1/2" instaladas em furos de diâmetro de 4". Eventualmente, os tubos poderão ser providos de válvulas manchetes para permitir injeções posteriores. Nas partidas, recomenda-se prover duas linhas de tratamento na calota superior e uma única linha de tratamento. É necessário um estudo de locação e angulação do tratamento para que as enfilagens não deflitam e caiam na região da cabeça de corte das máquinas. O comprimento será entre 15 e 18 m;
- Ainda no caso de camadas argilosas principalmente no teto do túnel, recomenda-se ainda prover enfilagens tubulares de aço Schedule ao longo da segunda linha de tratamento, de modo a também servir como "tirantes" para a abertura dos túneis;
- Pregagem da frente para partida e chegada, com barras de fibra de vidro, instaladas em furos de diâmetro de 4", e dispostas em malha de 1,50 m. Desejável que as barras de fibra de vidro estejam amarradas a um tubo de PVC diâmetro de 2" manchettato (válvulas manchetes a cada metro);
- Nas camadas arenosas, deve-se prever septos frontais (tampão) de, aproximadamente, 3 m de espessura, executado com CCPV a partir da superfície (em locais com área disponível) ou com CCPH, a partir da unidade construtiva (em locais sem área superficial disponível). Esses septos são recomendados somente para as partidas das tuneladoras;



Prefeitura Municipal de Curitiba

Secretaria Municipal de
Planejamento e Administração

Rua Solimões, 160
Fone: 3350-9022
80.510.140
São Francisco
Curitiba – PR
www.curitiba.pr.gov.br

- Rebaixamento temporário do lençol freático para alívio da pressão hidrostática, realizado com poços de bombeamento (em locais com área disponível na superfície) ou com DHPs (nos locais sem área disponível na superfície). São recomendados tanto para as partidas como para as chegadas.

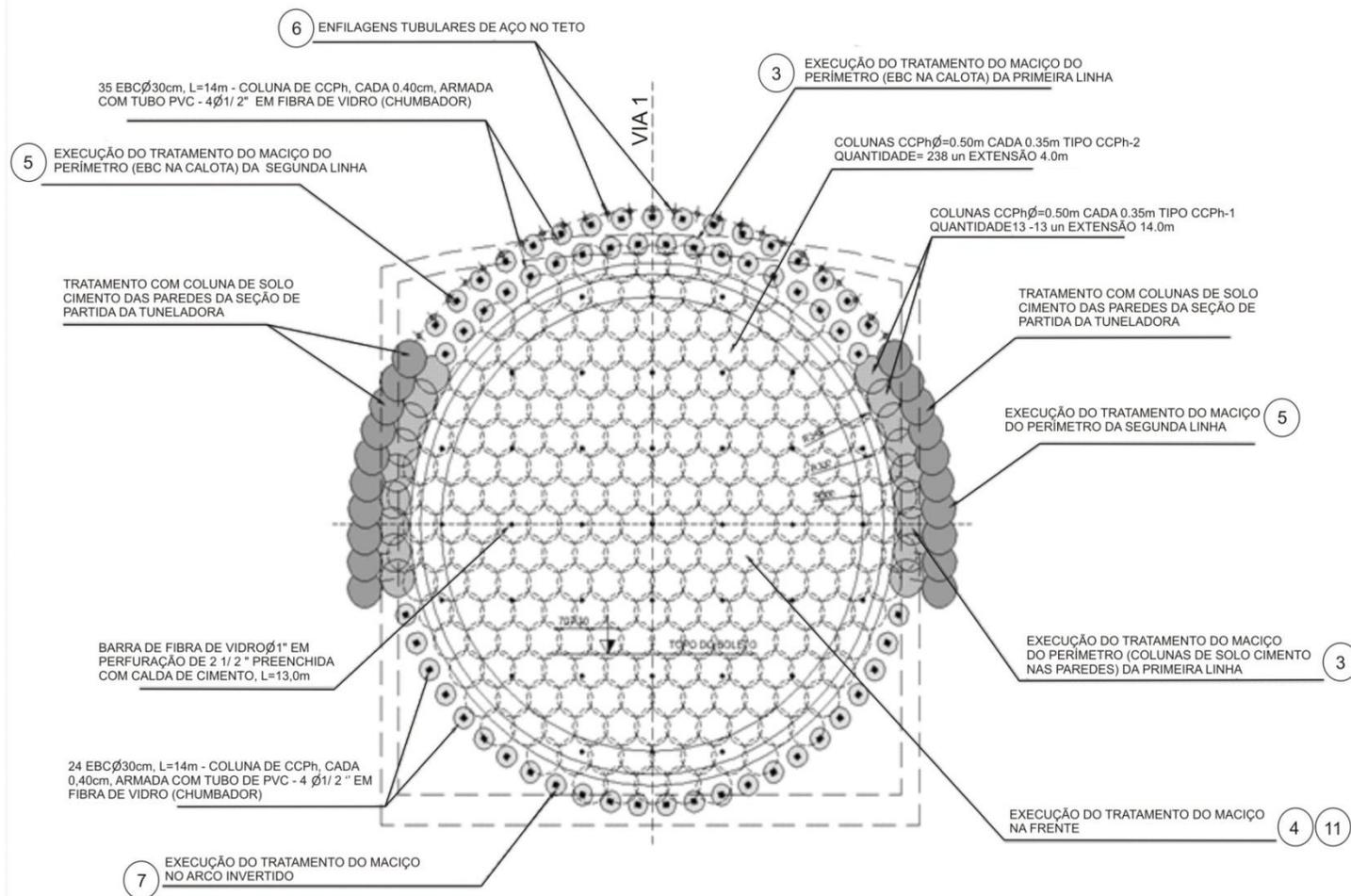
A sequência de figuras, a seguir, ilustram conceitualmente os tratamentos para as chegadas e partidas das tuneladoras.



Prefeitura Municipal de Curitiba

Secretaria Municipal de
Planejamento e Administração

Rua Solimões, 160
Fone: 3350-9022
80.510.140
São Francisco
Curitiba - PR
www.curitiba.pr.gov.br



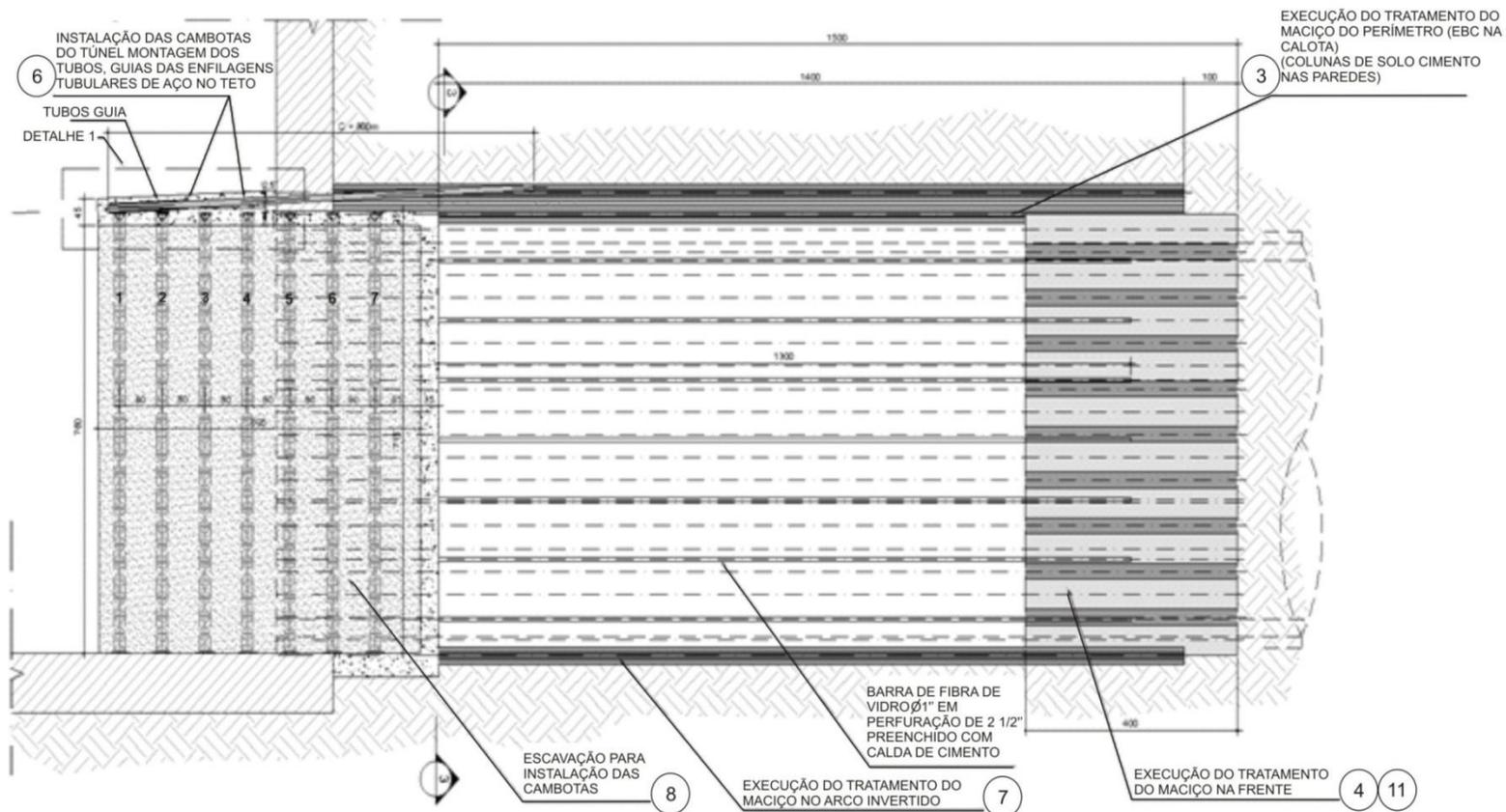
Seção conceitual de tratamento para partida de uma tuneladora



Prefeitura Municipal de Curitiba

Secretaria Municipal de
Planejamento e Administração

Rua Solimões, 160
Fone: 3350-9022
80.510.140
São Francisco
Curitiba - PR
www.curitiba.pr.gov.br



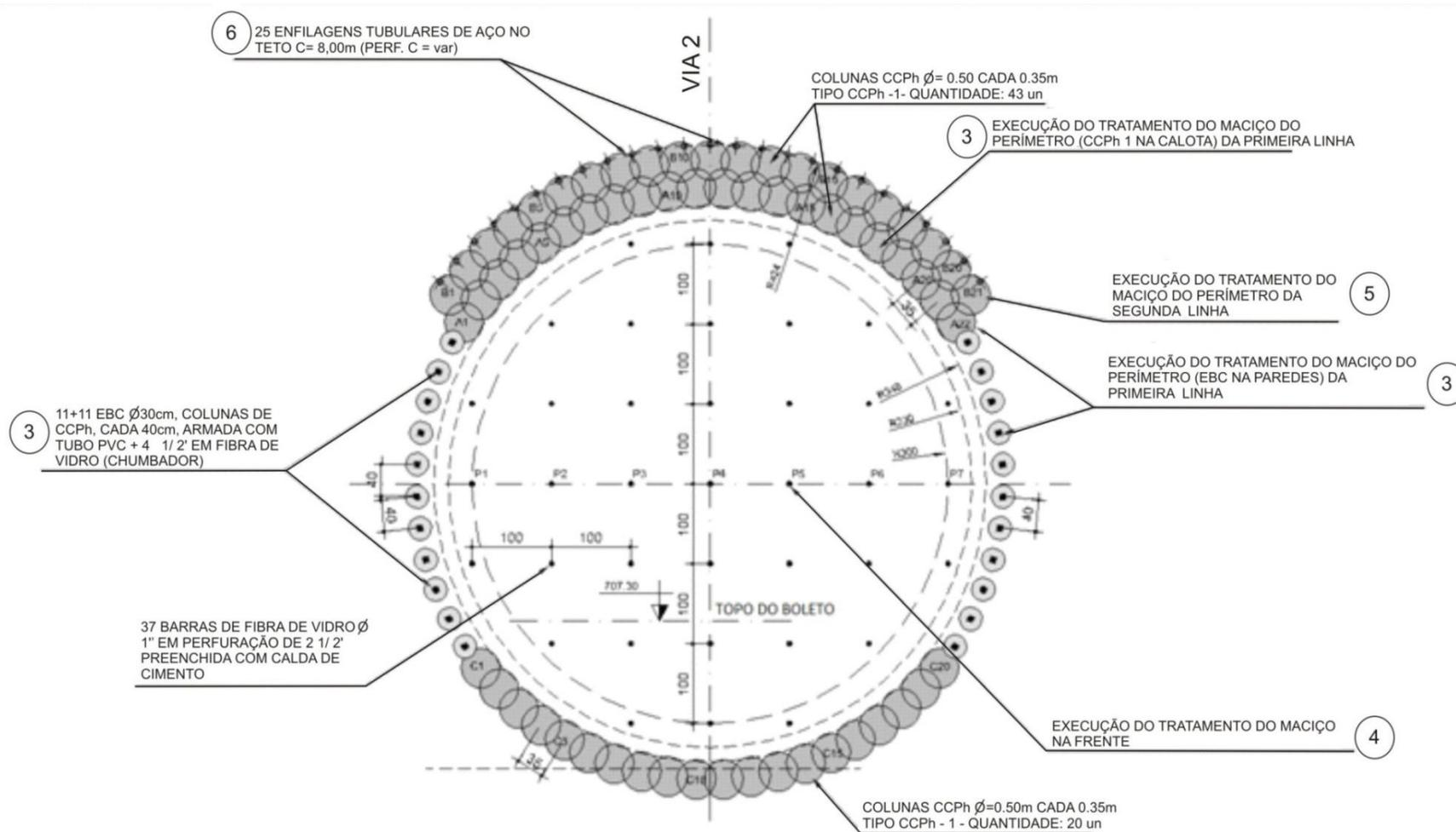
Seção longitudinal conceitual de tratamento para partida de uma tuneladora



Prefeitura Municipal de Curitiba

Secretaria Municipal de
Planejamento e Administração

Rua Solimões, 160
Fone: 3350-9022
80.510.140
São Francisco
Curitiba - PR
www.curitiba.pr.gov.br



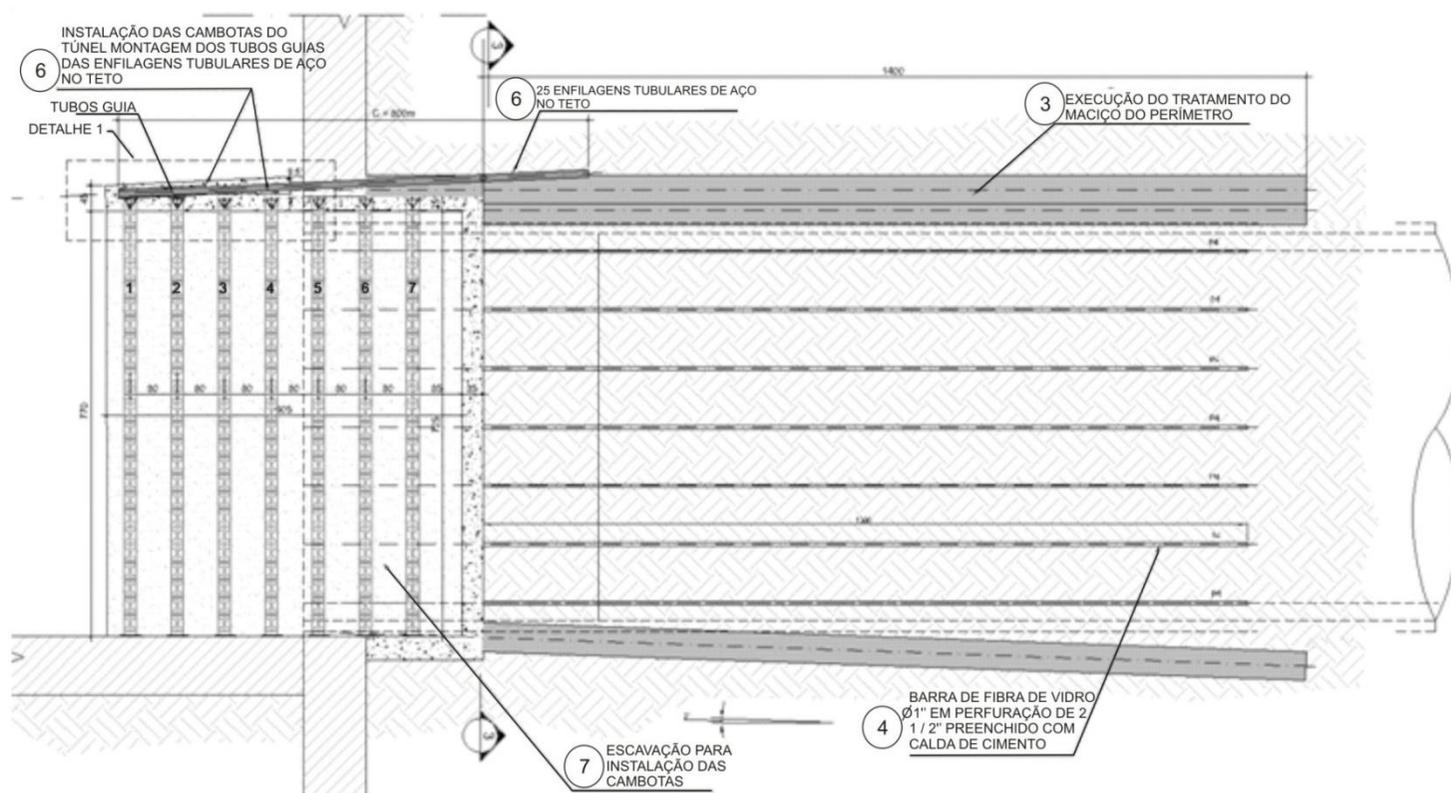
Seção conceitual de tratamento para chegada de uma tuneladora



Prefeitura Municipal de Curitiba

Secretaria Municipal de
Planejamento e Administração

Rua Solimões, 160
Fone: 3350-9022
80.510.140
São Francisco
Curitiba - PR
www.curitiba.pr.gov.br



Seção longitudinal conceitual de tratamento para chegada de uma tuneladora



Nas unidades construtivas executadas pelo método das valas à céu aberto, deve-se prever um tratamento para garantir a estabilização do maciço durante as fases de corte e demolição das contenções. Eventualmente, esse tratamento poderá ser parte do tratamento utilizado para as manobras de partida e chegada das tuneladoras. São usuais pregagens de frente com barras de fibra de vidro e fechamento da frente em concreto projetado.

As soluções de tratamento (CCPh, CCPv, enfilagens e pregagens frontais) e de rebaixamento temporário do lençol freático são particulares para cada emboque e desemboque, devendo ser estudadas singularmente.

c) Estrutura de reação

A partida das tuneladoras é realizada com o equipamento posicionado próximo à parede da unidade construtiva, sendo montada uma estrutura metálica de reação imediatamente atrás de cada equipamento.

Para que os macacos hidráulicos tenham apoio e possam exercer o empuxo necessário para o avanço do equipamento, são instalados anéis armados de dentro da cauda até o primeiro encostado na estrutura de reação. Dessa maneira, os esforços aplicados pelos macacos hidráulicos são diretamente transmitidos à estrutura de reação. Na Linha 4 – Amarela, em São Paulo, foram necessários 9 anéis para as partidas.

Ao iniciar a escavação do maciço, em razão da existência do tratamento, o Shield opera em módulo aberto até alcançar o septo frontal (tampão). Nesse percurso, são ao menos instalados dois anéis de revestimento. Nessa situação, o empuxo aplicado pelos macacos hidráulicos é mínimo, necessário apenas para vencer o atrito entre a máquina e o solo, concreto ou aço.



Após ser executado o preenchimento entre o anel de revestimento do túnel e a parede da unidade construtiva, o equipamento inicia a operação em modo fechado, aplicando uma pressão mínima de frente contra o maciço escavado. É recomendado o rebaixamento do lençol freático durante a partida da tuneladora, de modo a possibilitar a aplicação de pressões mínimas de trabalho.

A escavação em modo aberto e a aplicação de pressão mínima quando iniciada a operação em modo fechado possibilitam a otimização da estrutura metálica de reação e a partida do shield.

No sentido transversal do túnel, à medida que o shield avança e o anel fica exposto sem a proteção da sua cauda, estruturas metálicas laterais provisórias serão montadas para que os segmentos do anel não se desmontem por falta de pressão lateral confinante.

Para os casos de unidades construtivas de pequena dimensão, resultando em trecho de arraste curto que torne inviável a execução da estrutura de reação, recomenda-se montar anéis completos no interior da unidade construtiva, escorando-os lateralmente também com alguma estrutura metálica. Nesses casos, a partida da máquina é realizada com reação no próprio túnel já executado.

Em ambos os casos (com ou sem estrutura de reação) em, aproximadamente, 30 anéis escavados, montados e grouteados, é possível desmontar os anéis internos de reação e dar prosseguimento à execução das estruturas internas da unidade construtiva.



3.2.3.7. Arraste do Shield

Os arrastes do shield estão previstos nas estações, poços e túneis NATM de transição. O método mais comum para o arraste é o embutimento de trilho TR57 na estrutura de fundo, embebido de graxa, sobre o qual é realizado o arraste do equipamento. Os trilhos normalmente são colocados com uma angulação de 2 a 30 graus do eixo central.

A forma mais econômica e eficaz para o deslocamento é a montagem de poucos segmentos do hemisfério inferior do anel, ao invés do anel completo, possibilitando ao shield se empurrar com os próprios macacos, apoiando-os nos segmentos montados.

Caso seja necessário arrastar o shield na direção oposta à de operação, ele pode ser puxado com cabo de aço, por meio de um guincho apoiado em um nicho da laje.

Previsão de peso no arraste de trilho:

- Peso estimado do shield igual a 1.350 ton;
- Peso estimado do corpo principal igual a 810 ton;
- Comprimento provável do corpo principal igual a 4,20 m;
- Peso em cada trilho igual a $(810/4,2)/2 = 96,4$ ton/m.

Considerar 100 ton/m. O trilho normalmente usado é o TR57.



3.2.3.8. Revestimento

Os anéis de revestimento serão de concreto armado pré-moldados, de geometria tronco-cônica, para permitir o melhor ajuste da montagem dos segmentos com o alinhamento do túnel além de corrigir eventuais desvios. Esse tipo de anel é conhecido como anel universal e tem sido largamente adotado nas obras mais recentes em túneis escavados por máquinas tuneladoras. A conicidade dos anéis é determinada em função do diâmetro do túnel, do mínimo raio de curva e em função da largura média do segmento.

Quanto à largura média do segmento, é usual trabalhar com valores entre 1 e 2 m. Para o presente caso, recomenda-se a largura de 1,50 m.

Quanto ao mínimo raio de curva, recomenda-se que a máquina seja capaz de realizar curvas de raio 50 m menor do que o mínimo raio do traçado geométrico. Para o presente caso, o menor raio de curva é de 300 m. Portanto, recomenda-se que a máquina seja capaz de realizar curvas de até 250 m.

De posse desses valores, e considerando o diâmetro de escavação de 11 m, é possível estimar uma conicidade mínima de 26 cm. Conicidades superiores poderão ser adotadas sem prejuízo para a montagem dos segmentos.

Quanto à espessura do anel, é usual trabalhar com espessuras da ordem de diâmetro interno/22. Considerando um diâmetro interno de 9,81 m, a mínima espessura recomendada para o segmento é de 42 cm. Convém que a espessura adotada seja de 45 cm.

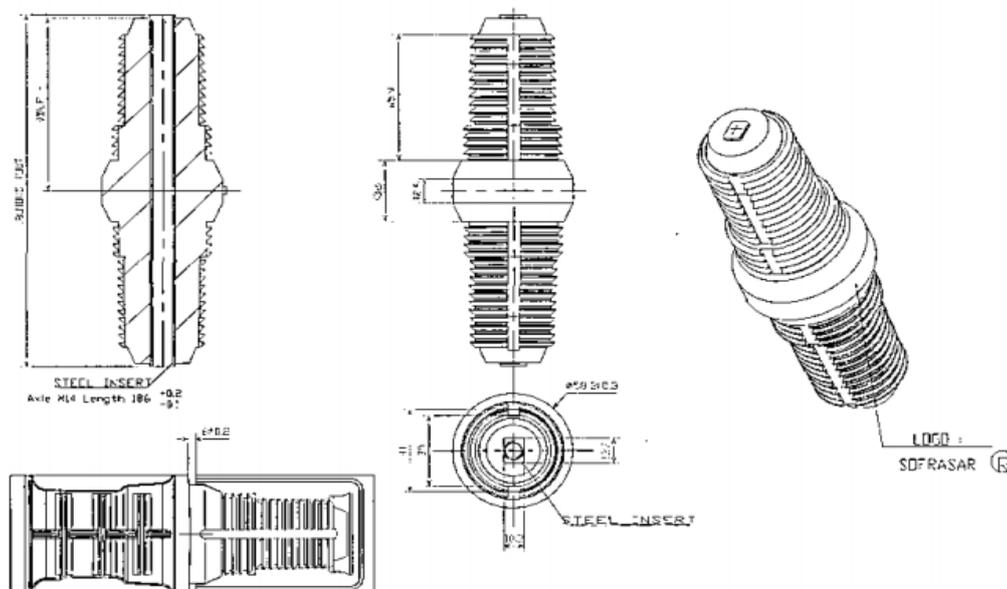
A segmentação dos anéis é proporcional ao número de pares de cilindros de empuxo. No entanto, tendo em consideração o histórico de equipamentos de similar diâmetro, estima-se uma configuração inicial dada por 8 segmentos tipo mais um segmento chave. Considerando uma configuração mínima de 2 pares de cilindros de empuxo por



segmento mais um par no segmento chave, ter-se-á um total de 17 pares de cilindros acoplados à máquina.

Conforme visto, o empuxo total estimado para a máquina é da ordem de 100.000 kN. Portanto, os pares de cilindros terão capacidade de reação para 5.882 kN, ou 6.000 kN (3.000 por cilindro), e os anéis de revestimento estarão dimensionados para esse carregamento.

A ligação entre anéis (ligações entre juntas circunferenciais) poderá ser realizada com conectores plásticos específicos para esse fim. Para esses, são recomendados conectores tipo Sofrasar SOF-FIX-ZUB ou equivalente. O fornecedor desses conectores fornecerá detalhes construtivos, bem como características mecânicas do material a ser empregado para incorporação no projeto executivo. As figuras, a seguir, apresentam detalhes típicos desse conector:



Detalhe típico de um conector tipo Sofrasar SOF-FIX-ZUB



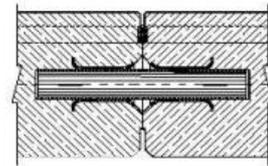
CONEX DOWEL



TIMBER DOWEL



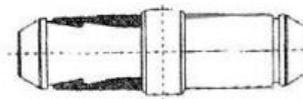
ANEX DOWEL



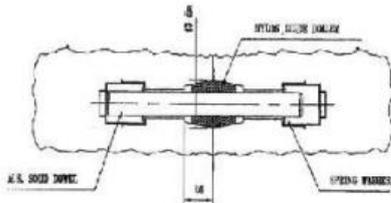
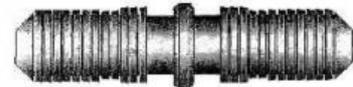
SYNEX DOWEL



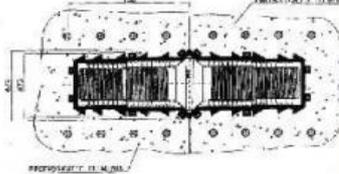
BUCLOCK RECESS COUPLER



“BICONO” DOWEL



FAST LOCK DOWEL SYSTEM



“BIBLOCK SYSTEM 60/200”



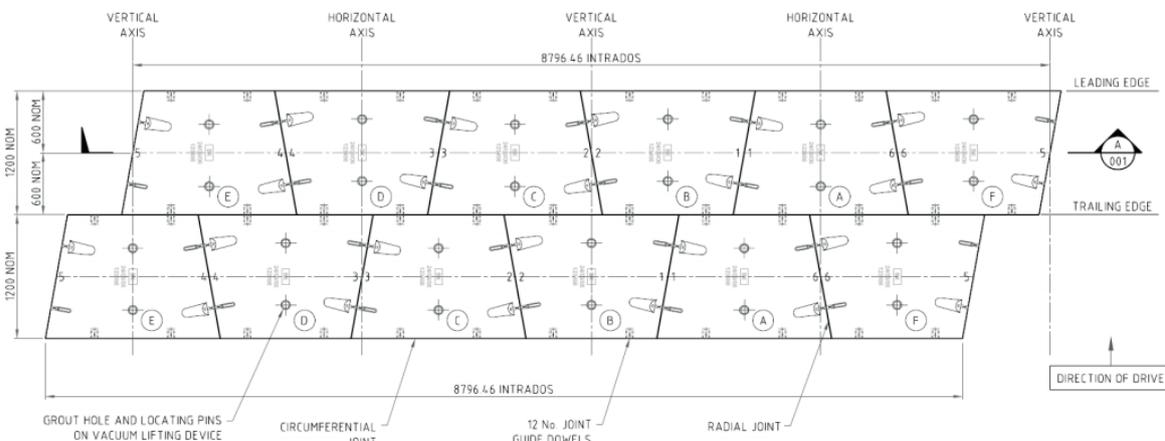
“SOF-CLIP”/“SOF-FIX” DOWEL

Esquemas típicos de conectores de ligação entre anéis

As ligações radiais (entre segmentos) podem ser realizadas através de parafusos retos de aço tipo ASTM A-325 tipo 3, grau A, ou outro equivalente.

É recomendada a utilização de barras-guia (“guide-rod”) que auxiliam no deslizamento de uma peça sobre a outra. Caso opte-se pela utilização de juntas radiais trapezoidais e barras guia, poder-se-á eliminar os parafusos.

A figura, a seguir, apresenta uma elevação típica de um anel segmentado, mostrando as diversas conexões usualmente empregadas.



Elevação desenvolvida típica de um anel segmentado

Os anéis de revestimento ainda serão dimensionados para resistir aos esforços decorrentes de sua fabricação, estocagem, transporte, manuseio ou montagem dentro das máquinas e ainda, das ações das injeções de grout do espaço anelar entre escudo e segmento.

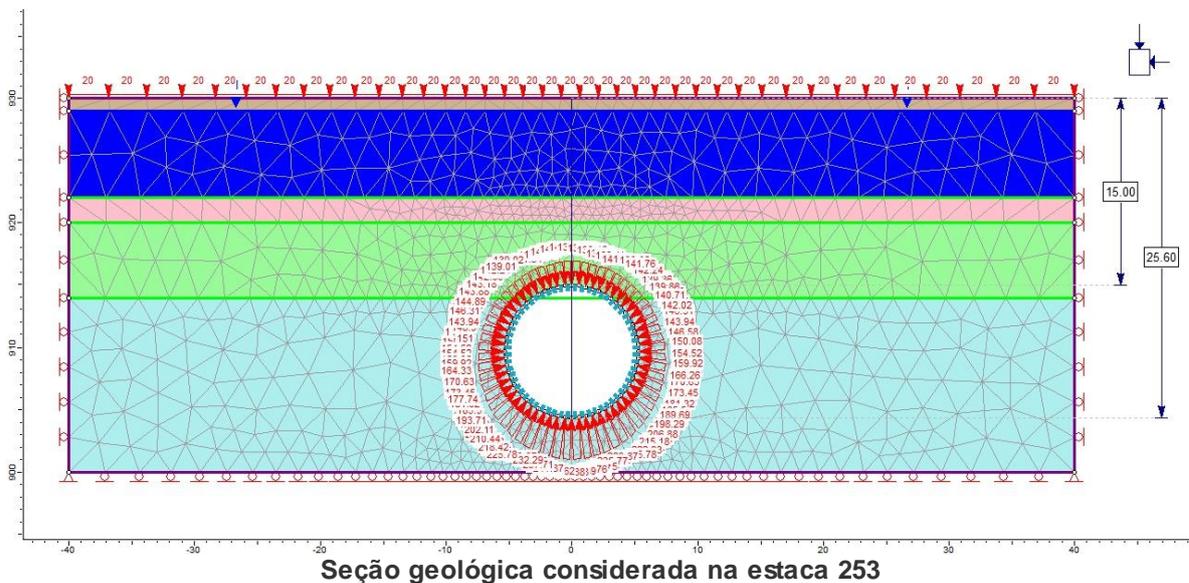
Por fim, os segmentos serão analisados frente às solicitações geomecânicas críticas ao longo do traçado geométrico, bem como considerar eventuais sobrecargas superficiais ou influências de construções adjacentes.



3.2.3.9. Simulação Numérica

A figura, a seguir, apresenta a seção analisada (estaca 253). Nessa seção, a geologia é formada por um capeamento de aterro sobreposto a uma camada de argila intemperizada da Formação Guabirota. Sotoposta a essa, ocorre uma delgada lente de areia argilosa – argila arenosa, e logo abaixo, uma camada de argila não intemperizada da Formação Guabirota.

Na base dessa camada, ocorrem solos não amostrados, aqui tratados como solos residuais de gnaiss. Os parâmetros geotécnicos foram os apresentados no item 3.2.3.1. O nível d'água local encontra-se a um metro de profundidade.

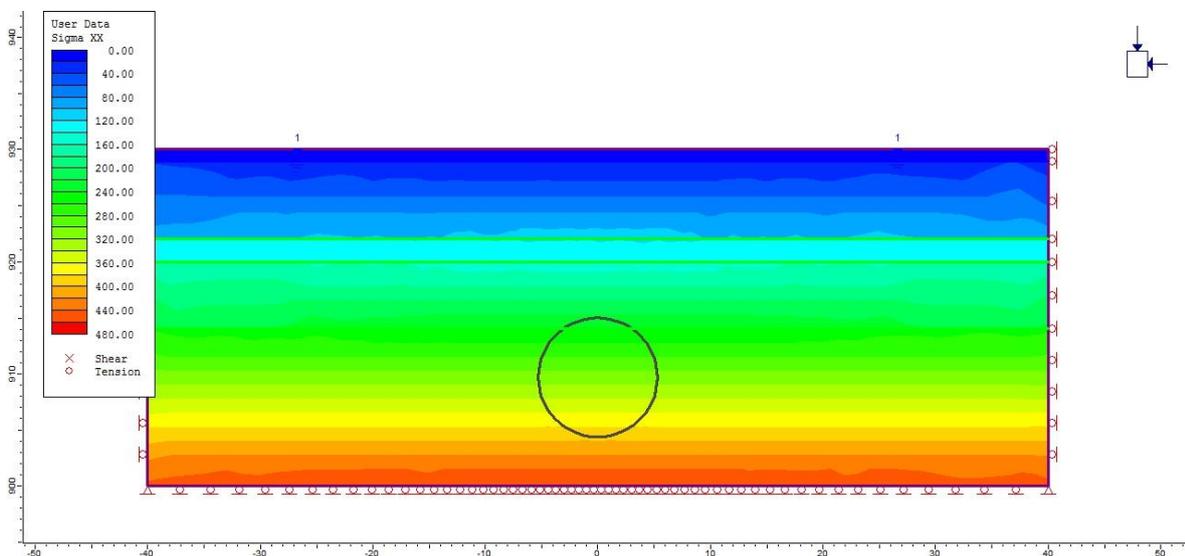
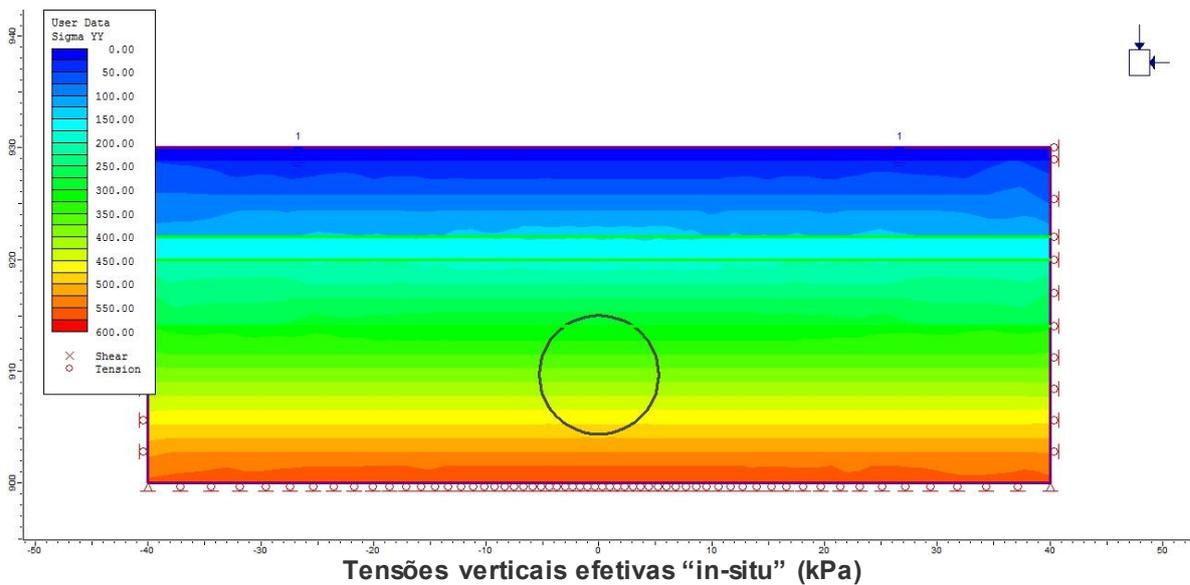


Nas análises, foi empregado o software Phase2, da RocScience inc., amplamente difundido no meio técnico especializado. As simulações foram do tipo faseada para considerar as alterações no estado de tensões inicial do maciço, decorrente do alívio de tensões gerado pelas escavações.



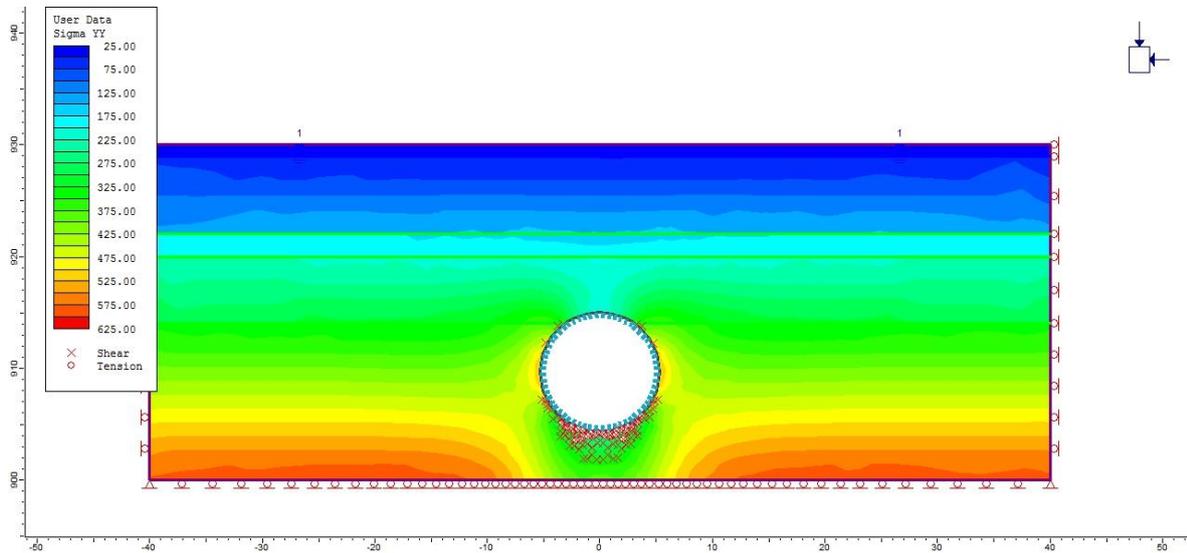
Duas situações foram analisadas. Na primeira, foi considerado um alívio de 15% para maximizar os esforços no revestimento. Na segunda, foi considerado um alívio de 50% para maximizar as deformações e plastificações no maciço. Em ambas as situações, foi considerada uma sobrecarga superficial de 20 kN/m².

O conjunto de figuras, a seguir, apresentam os resultados obtidos para a primeira situação analisada. Conforme pode ser observado, o nível de plastificação no maciço é pequeno, resultando em recalques superficiais da ordem de 12 mm.

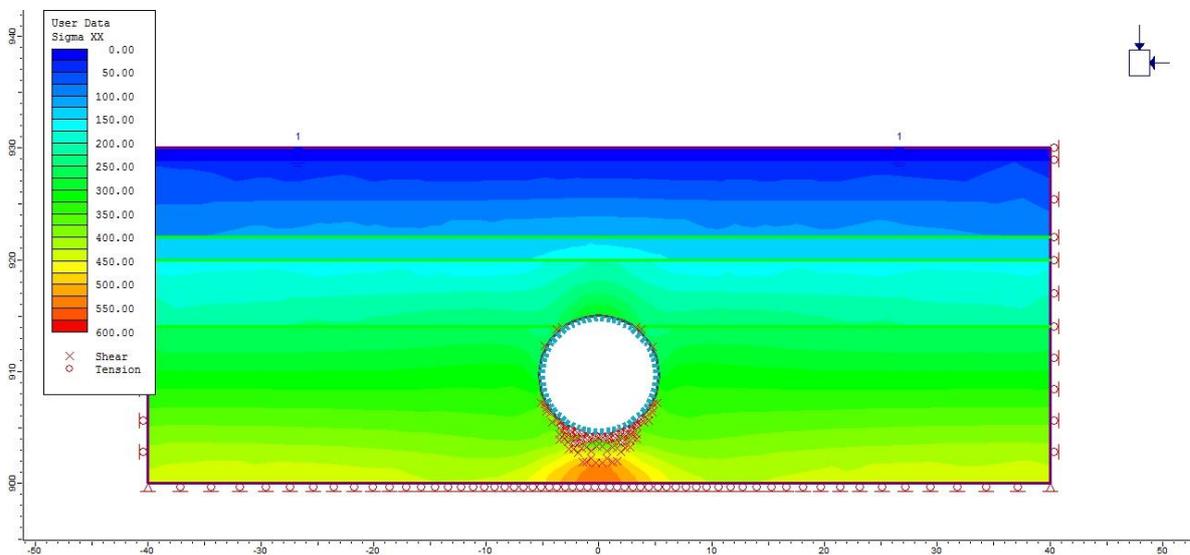




Tensões horizontais efetivas "in situ" (kPa)



Tensões verticais efetivas finais (kPa)



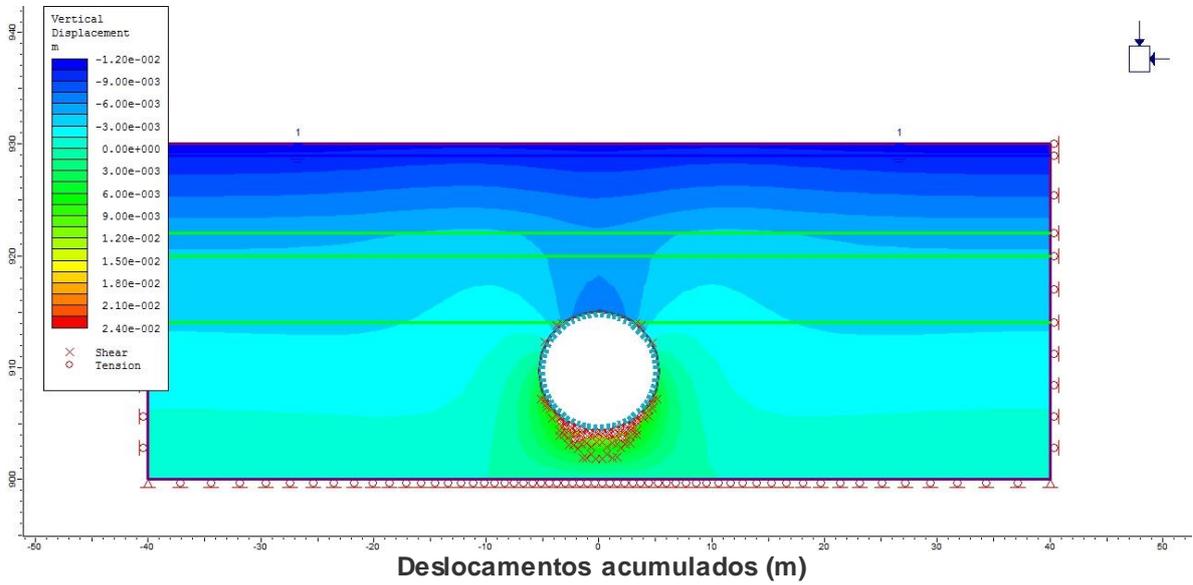
Tensões horizontais efetivas finais (kPa)



Prefeitura Municipal de Curitiba

Secretaria Municipal de
Planejamento e Administração

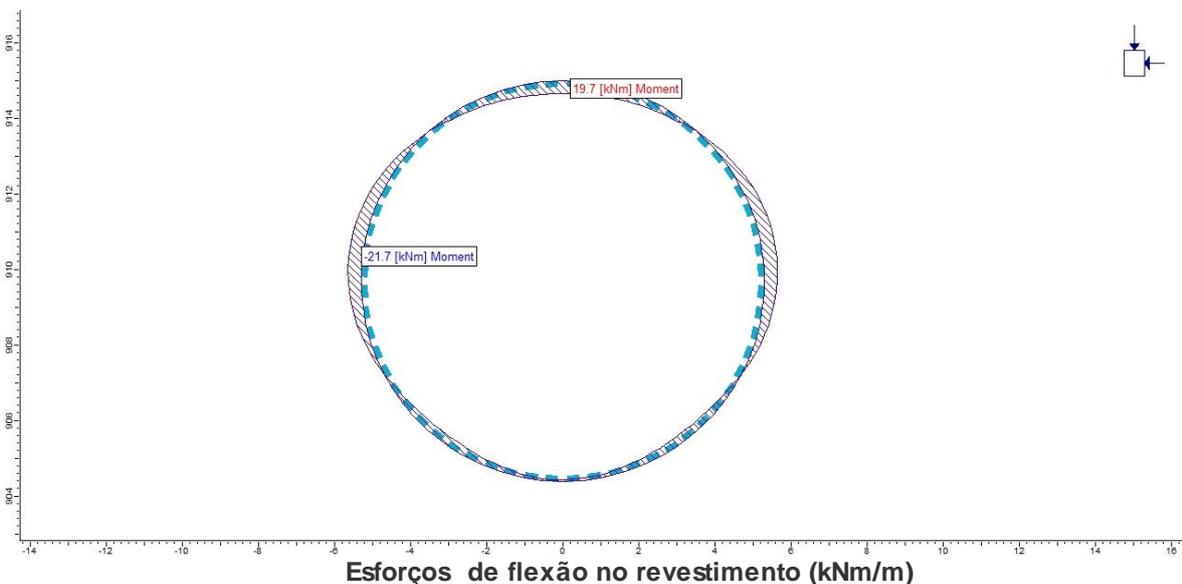
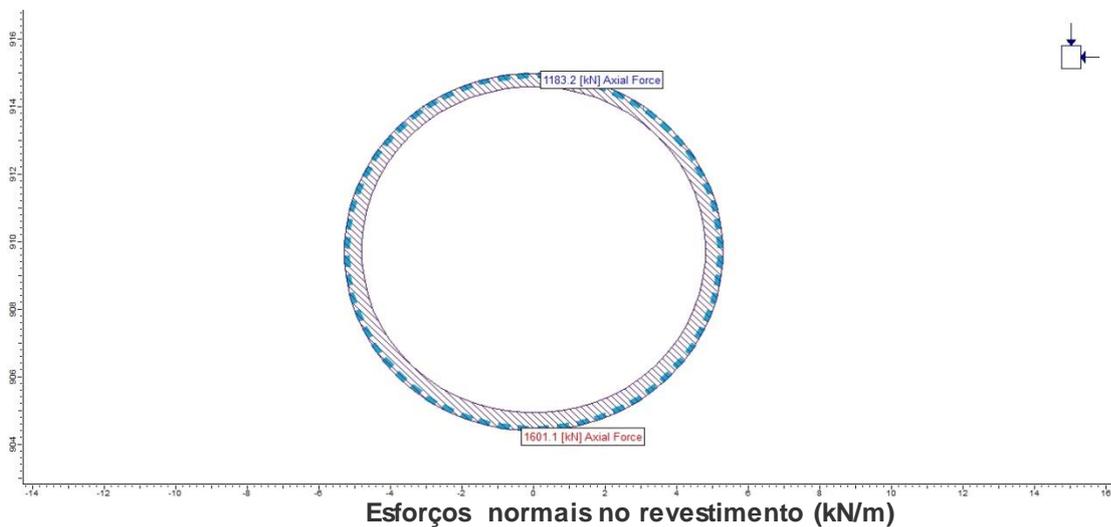
Rua Solimões, 160
Fone: 3350-9022
80.510.140
São Francisco
Curitiba - PR
www.curitiba.pr.gov.br





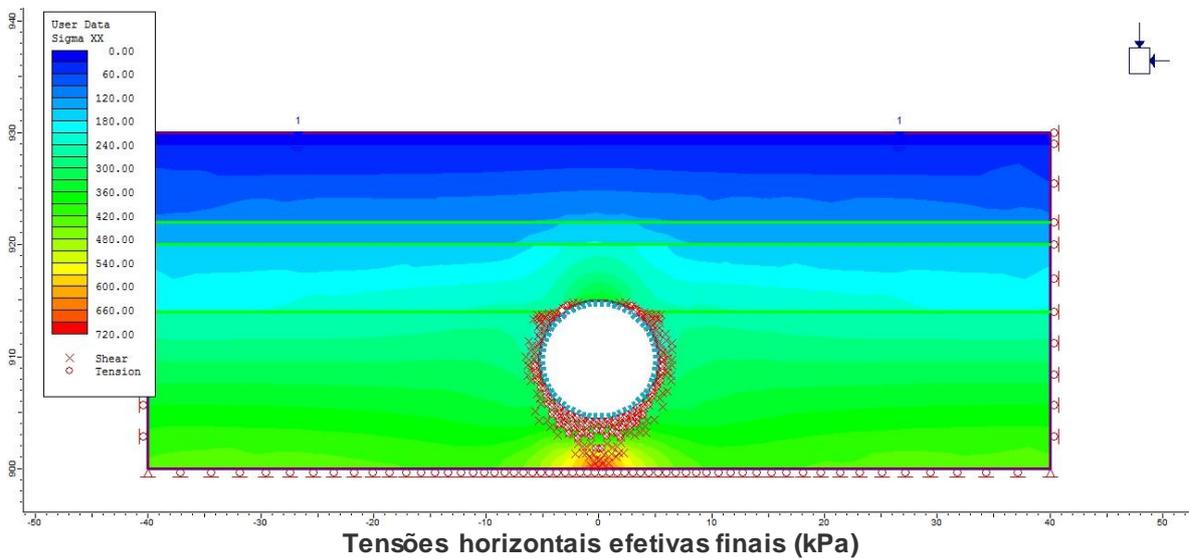
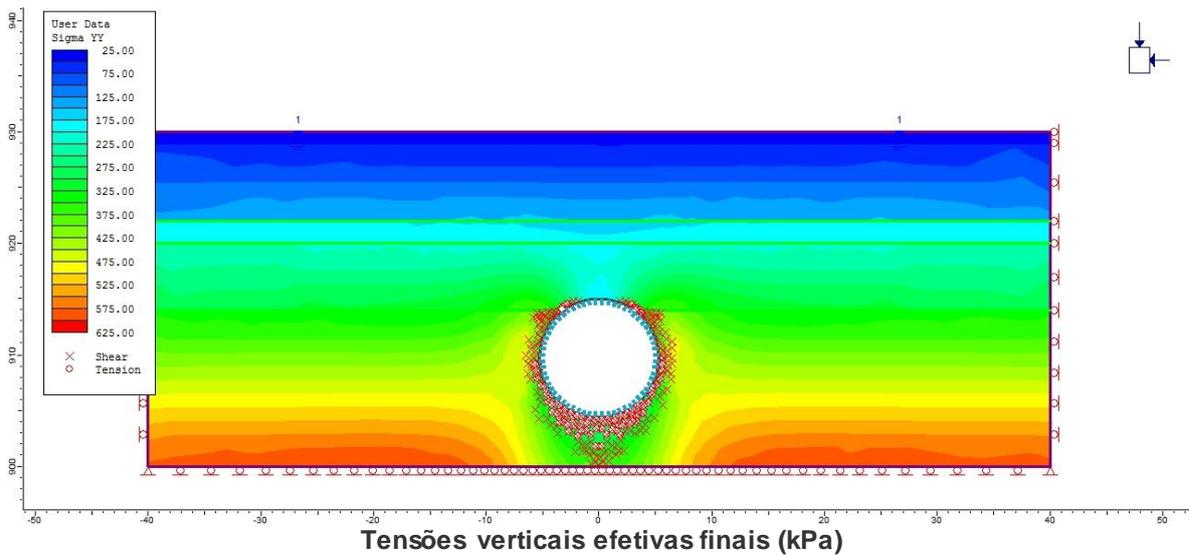
As figuras, a seguir, apresentam os esforços no revestimento para a primeira situação analisada. Delas, é possível observar que a seção está inteiramente comprimida com tensões máximas da ordem de 3 MPa de compressão.

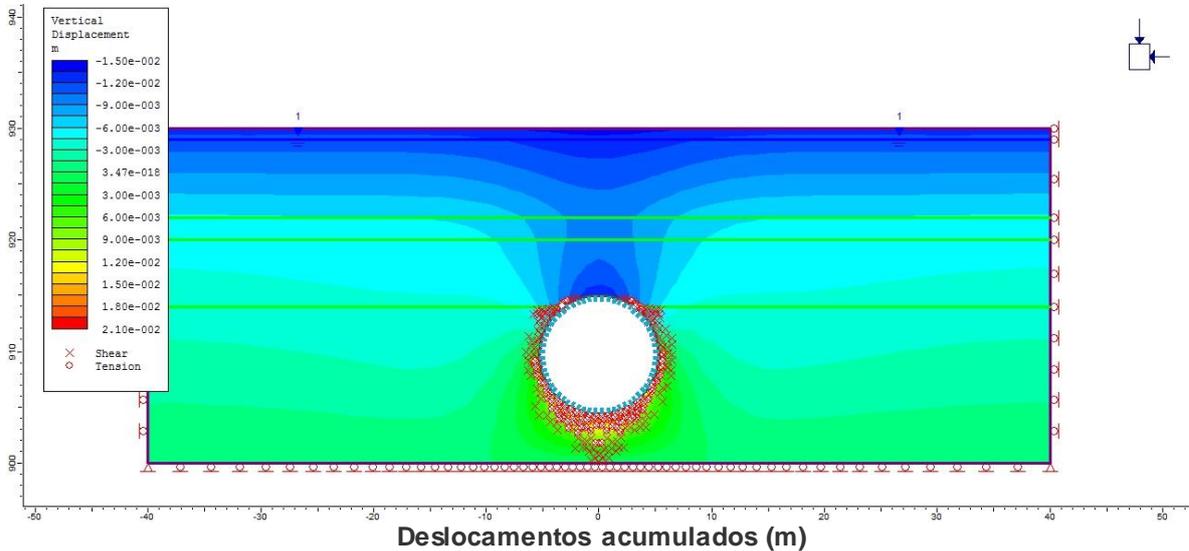
$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} = \begin{cases} \frac{1.183}{0,45} + \frac{19,7}{0,075} = 2.629 + 263 = 2.892 \text{ kPa} \\ \frac{1.183}{0,45} - \frac{19,7}{0,075} = 2.629 - 263 = 2.366 \text{ kPa} \end{cases}$$





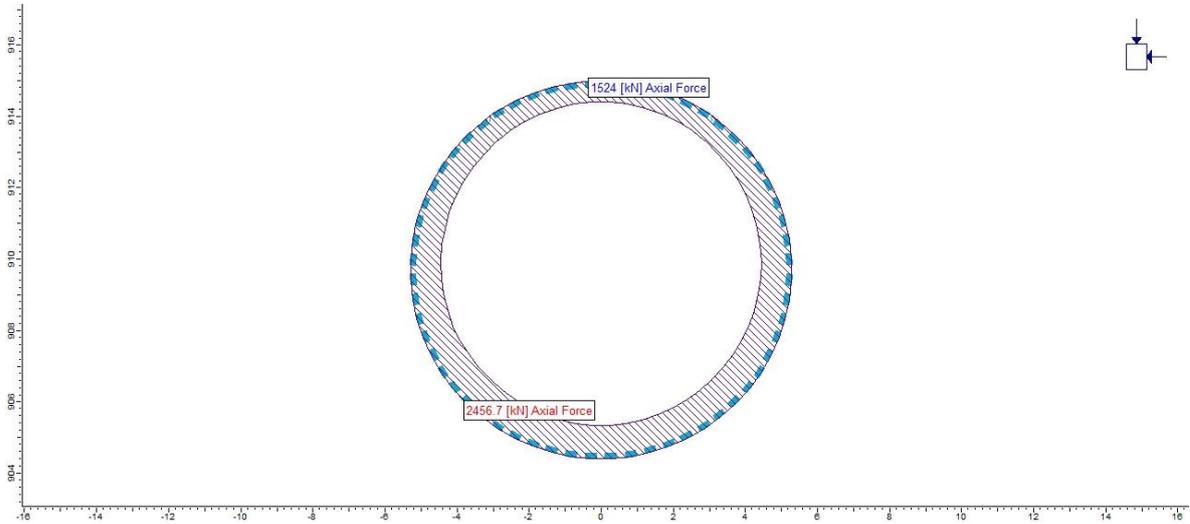
O conjunto de figuras, a seguir, apresenta os resultados obtidos para a segunda situação analisada. Conforme pode ser observado, o nível de plastificação no maciço é pequeno, resultando em recalques superficiais da ordem de 15 mm.



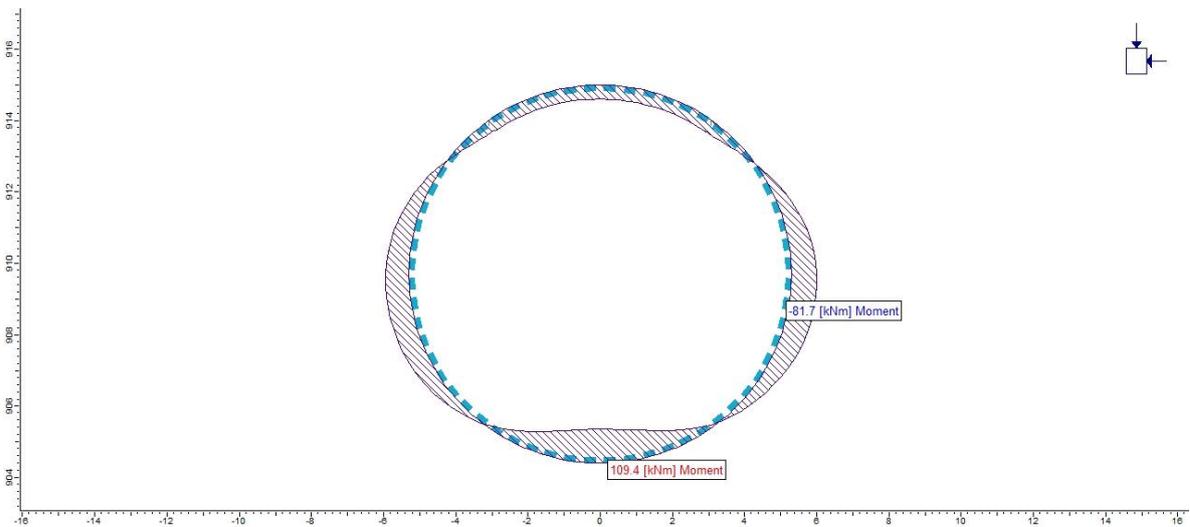


As figuras, a seguir, apresentam os esforços no revestimento para a primeira situação analisada. Delas, é possível observar que a seção está inteiramente comprimida com tensões máximas da ordem de 7 MPa de compressão.

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} = \begin{cases} \frac{2,457}{0,45} + \frac{109,4}{0,075} = 5,460 + 1,459 = 6,919 \text{ kPa} \\ \frac{2,457}{0,45} - \frac{109,4}{0,075} = 5,460 - 1,459 = 4,001 \text{ kPa} \end{cases}$$



Esforços normais no revestimento (kN/m)



Esforços de flexão no revestimento (kNm/m)



3.2.3.10. Transporte da Máquina

Para o transporte dos elementos constituintes da máquina, suas dimensões e pesos estarão de acordo com os critérios e normas brasileiras utilizados no dimensionamento de pavimentos, estruturas e pontes.

As dimensões das peças serão compatíveis com os gabaritos do sistema viário de Curitiba e com as exigências dos órgãos responsáveis pelo gerenciamento de trânsito ao longo do percurso de transporte.

Para o projeto executivo, serão verificadas todas as normas e legislações referentes ao transporte de cargas de grandes dimensões e pesos.



3.2.3.11. Especificações dos Equipamentos Básicos para Shield EPB

Estão apresentadas, a seguir, as especificações dos equipamentos básicos que compõem o shield EPB.

a) Preâmbulo

As seguintes especificações sugerem as características mínimas para o dimensionamento do shield EPB, que será utilizado para a escavação do túnel de via da Linha Azul do Metrô de Curitiba. Cada fabricante poderá propor modificações e/ou melhorias a essas especificações, sugerindo soluções maturadas com a própria experiência em condições de escavação similares.

O equipamento será novo e terá garantia operacional do fabricante de, pelo menos, 10.000 horas de trabalho sobre a totalidade do TBM e de, pelo menos, 10.000 horas sobre as parte mais importantes do equipamento com garantia fornecida pelos sub-fornecedores (rolamento principal da cabeça de corte, bombas e motores hidráulicos, motores elétricos, quadros elétricos, transformadores, câmaras hiperbáricas, parafuso sem fim, esteira transportadora, eretor de segmentos, mangueiras hidráulicas, cabos elétricos, entre outros).

A máquina tuneladora será pressurizada do tipo EPB, com a possibilidade de ser operada também em modalidade aberta, tendo que ser projetada para trabalhar com uma pressão média de, no mínimo, 5 bar, seja com pressão de terra ou em modalidade hiperbárica.

A cabeça de corte terá a possibilidade de escavar as condições geológico-geotécnicas descritas no item 3.2.3.1, além de ter a capacidade também de escavar trechos em maciços rochosos classes IV-V.



A cabeça de corte tem que ter a possibilidade de instalar cortadores para o solo (Knifes, Picks, Rippers, entre outros) como também cortadores para rocha (DiscCutter). Todos os cortadores devem apresentar possibilidade de serem trocados, ainda na frente de escavação, por de trás da cabeça de corte (Back Loaded) ou devem ser acessíveis com facilidade pelas pás de carga da cabeça de corte.

Essas especificações visam eliminar a necessidade de disposição de pessoas à frente da cabeça de corte para execução dos serviços de troca ou manutenção dos cortadores, ou a necessidade de desmontar partes da cabeça para encontrá-los.

A velocidade de rotação da cabeça de corte será variável entre, aproximadamente, 0 a 4 rpm, em ambas as direções.

A motorização poderá ser elétrica ou hidráulica, com preferência para a motorização hidráulica. Caso seja escolhida a motorização elétrica, além do torque nominal, o fabricante confirmará o torque real de desbloqueio da cabeça de corte (torque de break out) em situação de rotação nula. O máximo torque teórico, calculado como soma do máximo torque de cada conjunto motor elétrico/redutor, não é representativo para cálculo do torque de break out, já que com esse tipo de acionamento dificilmente consegue-se o sincronismo perfeito de cada motor.

Por esse motivo, dá-se preferência à motorização hidráulica, pois com esse tipo há uma redução da eficiência do sistema, o que leva a um aumento de até 30% da potência elétrica instalada.

O sistema de vedação do acionamento principal será dimensionado para resistir a até um mínimo de 10 bar de pressão média na câmara de trabalho (working chamber) e poderá ser trocado no túnel sem precisar desmontar a cabeça de corte.

A cabeça de corte terá 1 ou mais sobrecortadores (over cutters), com extensão de, no mínimo, 75 mm. Cada “over cutter” será comandável pelo operador do shield de



maneira independente, sendo a posição de cada um controlada eletronicamente pelo PLC (programmable logic controller), permitindo escavar seções elípticas estabelecidas pelo operador.

A cabeça de corte terá um mínimo de 12 linhas independentes de injetores de espuma para o condicionamento do solo, uniformemente distribuídas sobre toda a superfície da cabeça.

As superfícies da cabeça de corte mais expostas ao desgaste serão protegidas por material de alta resistência ao desgaste, em forma de platinas de “chomocarbite” ou similares, com dureza de 50 a 60 Rc. A cabeça de corte deverá ter, no mínimo, 4 sensores de desgaste distribuídos em posições estratégicas.

A câmara de trabalho (“working chamber”) terá, pelo menos, 7 sensores de pressão, cada um com a possibilidade de ser trocado pelo interior do shield e, no mínimo, 4 linhas independentes de espuma para o acondicionamento do solo. Tanto a cabeça de corte quanto a câmara de trabalho, terão misturadores eficientes que garantam a agitação do material escavado enquanto a cabeça estiver girando.

O equipamento terá 2 câmaras hiperbáricas (“man locks”) operáveis separadamente e simultaneamente, para a segurança dos mecânicos que acessarem a câmara de trabalho do shield para realizar a manutenção da cabeça de corte. Uma terceira câmara hiperbárica também é requerida para o rápido acesso dos equipamentos e materiais (“material lock”). Cada câmara hiperbárica terá a capacidade mínima de 4 pessoas.

O shield terá 2 articulações, sendo a frontal “ativa” e a segunda “passiva”, podendo executar curvas com raio de 200 m menor.

A articulação ativa será dimensionada para poder resistir a até, pelo menos, 80% da máxima força de empuxo do shield e ter um curso de, ao menos, 200 mm. No mínimo,



4 cilindros da articulação ativa e 4 da articulação passiva terão sensores de medição de extensão.

Os selos das articulações ativas resistirão a, no mínimo, 6 bar de pressão de água ou ar e ter a possibilidade de ser trocados internamente ao shield. Em ambas as articulações, existirão também um selo emergencial que possa ser acionado em caso de necessidade (enquanto o shield permanecer parado por um longo período de tempo, por falha do selo principal ou por outras razões).

A cauda será dimensionada para não interferir com o extradorso do anel pré-fabricado, enquanto o shield avançar em trechos com curvas de raio mínimos.

A cauda hospedará, pelo menos, 6 linhas duplas de injeção de cada cimento bi-componente ou argamassa. As linhas serão desmontáveis para facilitar a limpeza.

A vedação entre a cauda e o extradorso do anel resistirá a, no mínimo, 6 bar de pressão. A vedação terá, no mínimo, 3 linhas de cepilhos com, pelo menos, 2 linhas de selo tipo escova e uma linha de plaquetas de aço harmônico.

Cada câmara de vedação terá, pelo menos, 18 linhas de graxas distribuídas em distância regulares entre si de, no máximo, 2 m. Os selos tipo escova e as plaquetas de aço harmônico serão trocados pelo interior do shield, após desmontagem do revestimento pré-fabricado.

O eretor de segmento será de tipo a vácuo, com 6 graus de liberdade de movimentação. Será possível operá-lo por controle remoto ou via cabo. A sua capacidade de carga será calculada de modo a possibilitar sua operação com peso de, no mínimo 2, vezes o peso do maior segmento do anel e coeficiente de segurança 2,0. O sistema de vácuo será calculado com o peso do maior segmento, coeficiente de segurança 2,5 e capacidade de vácuo de 80%. O eretor de segmento possibilitará a



montagem e o desmonte de um anel em cima das 3 linhas de selo de vedação da cauda.

O parafuso sem fim terá capacidade de 1.000 m³/h. Ele será telescópico, terá velocidade variável entre 0 e 24 rpm e poder operar em ambos sentidos de rotação. Além disso, terá duas portas (acessos) para impedir a entrada ou saída descontrolada de material.

A porta frontal do parafuso sem fim poderá ser operada só quando o parafuso for completamente retraído e permitirá isolar o tubo da câmara de trabalho para possibilitar trabalhos de manutenção ou reparos na hélice e na camisa do parafuso.

A porta traseira do parafuso sem fim fechará a saída de material do parafuso, bloqueando a descarga na esteira transportadora, e poderá trabalhar de modo parcial (parcialmente aberta). A porta traseira será fechada automaticamente em caso de apagão elétrico do shield.

O parafuso sem fim terá, no mínimo, 2 sensores de terra, dos quais um posicionamento perto da frente e um posicionamento perto da porta traseira, e 8 linhas de entrada de 2” para conexão às linhas de espumas. A camisa do parafuso sem fim terá quantidade de janelas suficiente para permitir a limpeza e inspeção do interior do tubo do parafuso.

O comprimento total da couraça, câmara de trabalho e cabeça de corte do shield será inferior a 12 m.

O sistema de acondicionamento do solo terá 16 linhas de espuma/polímero independentes, das quais 12 dedicadas para a cabeça de corte, 2 para o parafuso sem fim e 2 para a câmara de trabalho. A capacidade do sistema de espuma tem que garantir um bom acondicionamento para todos os tipos de solo, com capacidade mínima de FIR=80% com FER=3 em velocidade de avanço do Shield de 40 mm/min e FIR=100% com FER=10 em velocidade de 80 mm/min.



O sistema de injeção de preenchimento terá, no mínimo, 6 bombas para calda de cimento bicomponente ou argamassa e um tanque de armazenamento de, no mínimo, 8 m³ de capacidade com agitador mecânico. O sistema poderá operar nas modalidades manual, parcialmente automático ou totalmente automático.

Todas as especificações do equipamento a ser comprado atenderão aos critérios estabelecidos nas respectivas normas e especificações técnicas.

b) Resumo das informações

- Diâmetro do shield.....11 m;
- Comprimento do shield.....≤ 12.000 mm;
- Pressão de operação.....5 bar;
- Diâmetro interno do anel.....9.810 mm;
- Espessura do anel.....450 mm;
- Raio mínimo de curva horizontal.....200 m;
- Raio mínimo de curva vertical.....200 m;
- Tipo de articulação.....dupla (ativa e passiva).

c) Cabeça de corte

- Diâmetro da escavação.....D=11,00 m;
- Potência Instalada: a ser definida pelo fabricante.....mínima de 6.500 kW, dependendo do tipo de motorização;
- Taxa de abertura.....entre 30% e 40%;
- Proteção antidesgaste.....exterior e interior;
- Velocidade de rotação.....aproximadamente de 0 a 4 rpm;
- Direção de rotação.....esquerda e direita;
- Torque nominal.....> 36.000 kN.m;
- Torque de break out.....> 43.000 kN.m;



- Rolamento principal (via útil).....> 10.000 horas;
- Over cutters.....de 2 até 75 mm de extensão cada um.

d) União rotativa

- Linha de espuma independente.....mínimo de 12 linhas;
- Pressão de flushing das linhas.....mínimo 100 bar;
- Linhas hidráulicas.....número a ser definido pelo fabricante;
- Linhas eletro/eletrônicas.....número a ser definido pelo fabricante.

e) Sistema de espuma

- Diâmetro da linha de injeção: especificado pelo fabricante.....mínimo de 50 mm;
- Número de geradores independentes.....mínimo de 16, sendo:
 - Mínimo de 12 linhas da cabeça de corte;
 - Mínimo de 2 linhas no parafuso sem fim;
 - Mínimo de 2 linhas no bulck head.

f) Articulação frontal ativa

- Extensão do curso.....mínimo de 200 mm;
- Macacos hidráulicos.....mínimo de 4 unidades com medidor de extensão.

g) Articulação passiva

- Extensão do curso.....mínimo de 200 mm;
- Macacos hidráulicos.....mínimo de 4 unidades com medidor de extensão.

h) Cauda



- Tipo articulado, com previsão de linha para injeção de calda de cimento com agentes químicos (bicomponentes) ou argamassa, linhas de graxa e selo com condição de ser reinstalado por dentro do shield;
- Selo do tipo escova.....mínimo de 3 linhas separadas (todas intercambiáveis por dentro do shield com capacidade de retenção de, no mínimo, 6 bar);
- Injeção de calda de cimento.....mínimo de 6 linhas (mais 6 de reserva);
- Diâmetro do tubo de injeção..... ≥ 50 mm;
- Injeção de compensação de bentonita.....mínimo de 12 aberturas radiais;
- Injeção de graxa.....mínimo de 18 linhas por câmara (18 x 2).

i) Câmaras hiperbáricas

- Número de câmara independente:
 - Capacidade de 4 pessoas para a principal;
 - Capacidade de 4 pessoas para a auxiliar.
- Número de câmaras para material 1;
- Pressão de operação 6 bar.

j) Macacos para empuxo

- Empuxo total..... ≥ 100.000 kN;
- Extensão de curso.....mínimo de 2.400 mm (para anéis pré-fabricados com largura de até 1.500 mm);
- Velocidade de extensão.....80 mm/min (durante escavação);
- Velocidade de extensão a retenção.....a ser definido pelo fabricante, para permitir (durante a instalação do anel) montar um anel de 9 segmentos em 20 minutos;
- Quantidade de macacos.....a ser definida posteriormente pela empreiteira conforme projeto executivo.



k) Parafuso sem fim

- Diâmetro normal.....de 1.000 a 1.200 mm;
- Máximo diâmetro dos grãos.....400 mm;
- Direção de rotação.....direita e esquerda;
- Velocidade.....de 0 a 24 rpm;
- Capacidade nominal.....1.000 m³/h;
- Torque.....a ser definido pelo fabricante, sugerido ≥ 400 kN.m;
- Potência.....a ser definido pelo fabricante.

l) Eretor

- Tipo.....telescópio;
- Movimentação.....6 graus de liberdade;
- Sistema de garra.....a vácuo;
- Volta ao longo do eixo.....sim;
- Rotação.....+/- 200 graus;
- Peso do segmento.....a ser definido pela empreiteira (o projeto básico prevê peso do maior segmento, com coeficiente de segurança $\geq 2,5$ e aplicação de 80% do vácuo);
- Bombas a vácuo.....mínimo de 2 (duas).

m) “Guiding System” e programa sequencial de montagem de anéis

- Sistema com teodolito motorizado;
- Target montado no escudo frontal;
- Comunicação wireless;
- Visualização na cabine de comando;
- Programa de cálculo sequencial de montagem de anéis;
- Interface com PLC do shield.



n) Esteira transportadora do shield

- Quantidade.....2 (uma principal e outra para pesagem ou reserva);
- Capacidade.....1.000 ton/h;
- Alimentação elétrica.....via FVD;
- Potência.....a ser definida pelo fabricante;
- Velocidade.....até 3,6 m/s;
- Básculas.....2 (duas).

o) Esteira transportadora contínua do túnel

- Configurações.....a serem definidas pela empreiteira.

p) Instrumentação geotécnica instalada no equipamento TBM

- Células de pressão total de contato.....7 unidades na câmara frontal (bulk head) 3 unidades no parafuso sem fim (no início, no meio e no final do parafuso);
- Células piezométricas de contato.....7 unidades na câmara frontal (bulk head) 3 unidades no parafuso sem fim (no início, no meio e no final do parafuso).

q) Sistema back-up

- Raio de curvatura mínimo de 200 m;
- Todos os trailers devem ser estruturados e planejados para acomodar os equipamentos e materiais auxiliares para escavação, montagem do anel, injeção de preenchimento e acondicionamento do solo;
- Guincho para transportar segmentos e materiais (capacidade de içamento de 9 ton);
- Alimentador/transportador (“segment feeder”) para levar os segmentos junto ao eretor, com capacidade para um anel;



- Sistema de ventilação do túnel, com diâmetro do duto a ser definido (2 cassetes para armazenamento com 150 m de comprimento de duto);
- Sistema de ventilação secundário back-up com entrega de ar na zona do eretor e volume suficiente para manter 0,5 m/s de fluxo com saída na zona do back-up (aproximadamente 50 m³/s);
- Bentonita (tanque de 10 m³, 2 bombas, pressão máxima de 6 bar);
- Sistema automático pressurizado para manutenção da pressão EPB com bentonita;
- Sistema automático de lubrificação dos selos do acionamento principal (bomba e graxa);
- Sistema automático de lubrificação dos selos da cauda (bomba e graxa);
- Sistema automático de lubrificação geral (bombas e graxa);
- Back-up para esteira transportadora com estação de extensão da esteira do túnel;
- Sistema para injeção de argamassa tipo bicomponente: mínimo de 6 bombas de injeção independentes tipo parafuso para componente A, mais 6 bombas para componente B ou 6 bombas a pistões para argamassa;
- Tanque reserva para calda de cimento com capacidade adequada para escavação de um anel e agitador mecânico tipo hélice;
- Painel de comando do sistema de injeção de bicomponente;
- Sistema de injeção de espuma com 16 linhas independentes e capacidade para FIR = 50% com FER = 2 e velocidade de 40 mm/min e para FIR = 80% com FER = 10 e velocidade de 80 mm/min;
- Sistema de injeção de polímero com 4 linhas independentes;
- Sistema hidráulico (tanque, circuito de filtração, circuito de refrigeração, circuito de pressurização, entre outros);
- Cabine de comando, com capacidade mínima para 4 pessoas, com ar condicionado e todos os equipamentos de controle computadorizados;
- Sistema de comunicação (5 interfones ex-proff), sistema de vídeo por CCTV (mínimo de 4 pontos); telefone para comunicação com o exterior;
- Equipamentos de segurança: detecção de gases O₂, CH₄, CO₂ e CO e interface PLC TBM para detectar/sinalizar níveis de perigo;



- Equipamento de segurança contra incêndio: sensores de fumaça em todos os painéis elétricos e nos transformadores, sprinklers de água nas passarelas do back-up e cortina de água no fim do back-up;
- Contêiner de emergência para incêndio, com capacidade para 12 pessoas e suprimento de ar para 3 horas;
- Sistema para lavagem de olhos;
- Contêiner ambulatório/primeiros socorros;
- Contêiner refeitório;
- Sistema de descarga rápida dos anéis com capacidade mínima de 1 anel completo;
- Sistema para extensão da estrutura das esteiras transportadoras contínuas do túnel;
- Roquetes para 4 mangueiras de água e ar de 4", com capacidade de 30 m cada;
- Sistema elétrico IP65;
- Sistema de armazenamento de cabos MT de alimentação elétrica do shield;
- Sistema para instalação do cabo permanente de alimentação do shield.



3.2.3.12. Considerações Finais

O presente documento apresentou uma especificação básica para a máquina tuneladora a ser empregada na construção do túnel de via da Linha do Metrô de Curitiba.

As análises foram realizadas com base nas informações geológicas-geotécnicas atualmente disponíveis, bem como relevo topográfico e traçado geométrico do túnel (alinhamento vertical e horizontal).

Para o presente estudo, foi considerado um diâmetro interno de 9,81 m, resultando em um diâmetro de escavação de 11 m. Conforme verificado, nessas condições, a cobertura mínima do equipamento gira em torno de 11 m, ao passo que a cobertura máxima em torno de 20 m. As pressões hidrostáticas máximas na antecâmara de trabalho deve girar em torno de 3 bar.

O equipamento do tipo EPB foi o recomendado em função do conhecimento geológico/geotécnico regional e da recente experiência brasileira acumulada com as construções das obras do Metrô de São Paulo.

No entanto, em função de novas informações geológicas, poder-se-á estudar um equipamento do tipo Mixed shield. Importante destacar a importância de haver um elevado volume de ensaios de granulometria na região a ser escavada pelo equipamento.

A cabeça de corte terá entre 30 e 40% de abertura, e será provida com bits de corte para escavação em maciços terrosos, com a opção de substituição por discos de corte para escavação em maciços rochosos e saprólitos. Um estudo de abrasividade será conduzido para avaliar os desgastes das ferramentas.



Estimativas iniciais de pressões de trabalho e de recalque foram realizadas. As pressões de trabalho máxima girarão em torno de 5 bar, devendo o equipamento estar preparado para pressões de até 6 bar. Em termos de recalques, os recalques superficiais máximos estimados giram em torno de 70 mm na região de máxima cobertura, e 180 mm na região de mínima cobertura.

Recomenda-se a adoção de anéis universais formados por segmentos pré-moldados de concreto armado para o revestimento do túnel. É proposta uma segmentação de 8 segmentos tipo mais um chave, resultando em 17 pares de cilindros hidráulicos de empuxo. Cada par de cilindros terá capacidade de 6.000 kN de empuxo.

As pressões de groutamento serão dimensionadas para pressões de até 6 bar. Na parte posterior da máquina (“tail-shield”), será provida de três linhas de escovas metálicas para permitir o adequado groutamento e não permitir a passagem de material e água para o interior do equipamento.

O shield terá 2 articulações, sendo a frontal “ativa” e a segunda “passiva”, podendo executar curvas com raio de 200 m menor. A articulação ativa será dimensionada para poder resistir a até, pelo menos, 80% da máxima força de empuxo do shield e ter um curso de, ao menos, 200 mm. No mínimo, 4 cilindros da articulação ativa e 4 da articulação passiva terão sensores de medição de extensão.

Por fim, todas as análises efetuadas mostraram que a execução do túnel com máquina tuneladora é perfeitamente aplicável e não requererá nenhum esforço não conhecido ou não vivenciado pela engenharia brasileira.



3.2.3.13. Referências

- ANAGNOSTOU, G. and KOVÁRI, K (1996). Face stability in slurry and EPB shield tunneling. In: International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground Proceedings. Mair, R.J. & Taylor, R.N (editors), London. A. A. Balkema: Rotterdam, pp.453-458;
- ATKINSON, J.H and POTTS, D.M. (1977). Stability of a Shallow Circular Tunnel in Cohesionless soil. *Geotéchnique*, v.27, n.2, pp. 203-215;
- BELLUZZI, O. (1967). *Scienzadelle Construzioni*. Editora Aguilar, Bolonha. pp 686-691;
- BELLUJEN, A. and TALMON, A.M. (2005). Monitoring and Modelling during Tunnel Construction. *Tunneling: A Decade os Progress Geodelft 1995-2005*. Taylor & Francis;
- BEZUIJEN, A.; TALMON, A.M.; JOUSTRA, J.F.W. and GROTE, B. (2005). Pressure Gradients and Muck Properties at the FACE of an EPB Tunneling: A Decade of Progress. *Geodelft 1995-2005*. Taylor & Francis;
- British Tunneling Society (2005). *Closed-Face Tunneling Machines and Ground Stability. A Guideline for Best Practice*. Thomas Telford, London;
- CAMPANHA, G.A.C.; RICCOMINI, C.; MELO, M.S.; HASUI, Y.; ALMEIDA, F.F.M.; DEHIRA, L. K. (1985). Análise do Padrão de Fraturamento Mesozóico-Cenozóico de Bacias Tafrogências Continentais do Sudeste Brasileiro. In: *Simpósio Regional de Geologia*, 5, São Paulo, 1985. Atas. São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, pp. 337-350;
- HARADA, T.; PEREIRA, F.; CAMPANHA, C.A.; FRANÇA, P.T.; GONÇALVES, F.L. and MAIA, C.H.T. (2009). São Paulo Line 4 –Yellow – EPB TBM Excavation - General Overview. *ITA-AITES World Tunnel Congress*. Budapeste, Hungria;
- MAIDL, B.; HERRENKECHT, M. and ANHEUSER, L. (1996). *Mechanised Shield Tunneling*. Ernst & Sohn, Berlin.