



GeoCompany

Tecnologia, Engenharia  
e Meio Ambiente

## MINI E MICRO TÚNEIS

 TUNNEL  
DAY 2019

*Prof. Dr. Roberto Kochen – Doutor em engenharia, Diretor do departamento de Infraestrutura do instituto de engenharia e Diretor da GeoCompany – Tecnologia, Engenharia & Meio Ambiente [kochen@geocompany.com.br](mailto:kochen@geocompany.com.br)*

DEZ 2019

www.geocompany.com.br  
+55 11 2110-7211 a 7214

## RESUMO

Pipe jacking é um método de escavação subterrâneo, desenvolvido no início da década de 1980, para túneis de pequeno diâmetro (< 3m).

Combinação da instalação de dutos subterrâneos através da cravação de tubos pipe jacking e da técnica de escavações subterrâneas com couraça mecanizada de pressões balanceadas por lama (slurry shield).



## RESUMO

Dá-se ênfase à definição de dois requisitos básicos de projeto

- Estimativa dos esforços de cravação
- Magnitude dos recalques induzidos pela construção do túnel.

Capacidade do sistema de cravação, espessura dos tubos cravados e o potencial de danos induzidos nas estruturas superficiais e utilidades enterradas.

## INTRODUÇÃO

Necessidade de melhoria e a expansão da rede de utilidades públicas (água, esgoto, eletricidade, telefonia etc.).

Execução de obras subterrâneas em valas a céu aberto causa impactos sócio-econômico- ambientais cada vez maiores.

Altos custos sociais inerentes aos atrasos e perturbações que ocasionam a milhares de pessoas

Minimizar os impactos e oferecer maior produtividade com menor risco técnico e econômico.

## MÉTODO

Poços de partida e chegada

Os primeiros a mobilizar os esforços de cravação dos tubos de concreto.

Chegada são utilizados para retirada do shield e posteriormente como poços de visita.

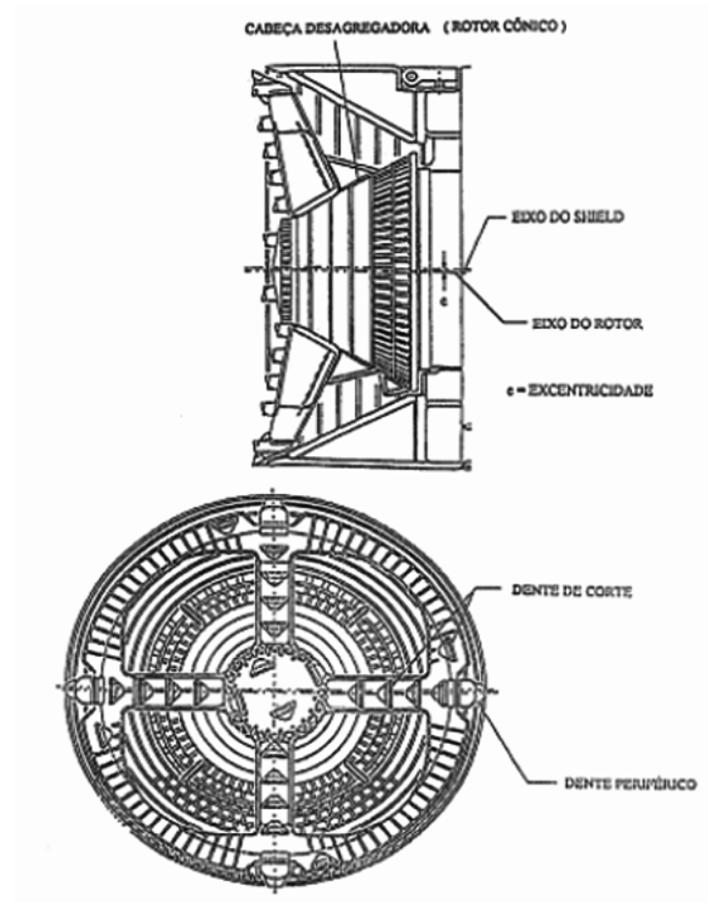


Figura 1 - Cabeça cortante desagregadora

## ARRANJO GERAL

- Cabeça cortante
- Cone
- Compartimento estanque
- Compartimento frontal é pressurizado com o bombeamento de lama bentonítica
- A lama tem a função de transportar o material escavado até tanques de decantação localizados na superfície.
- A lama volta a ser bombeada para o sistema.
- Cravação dos tubos de concreto

## ARRANJO GERAL

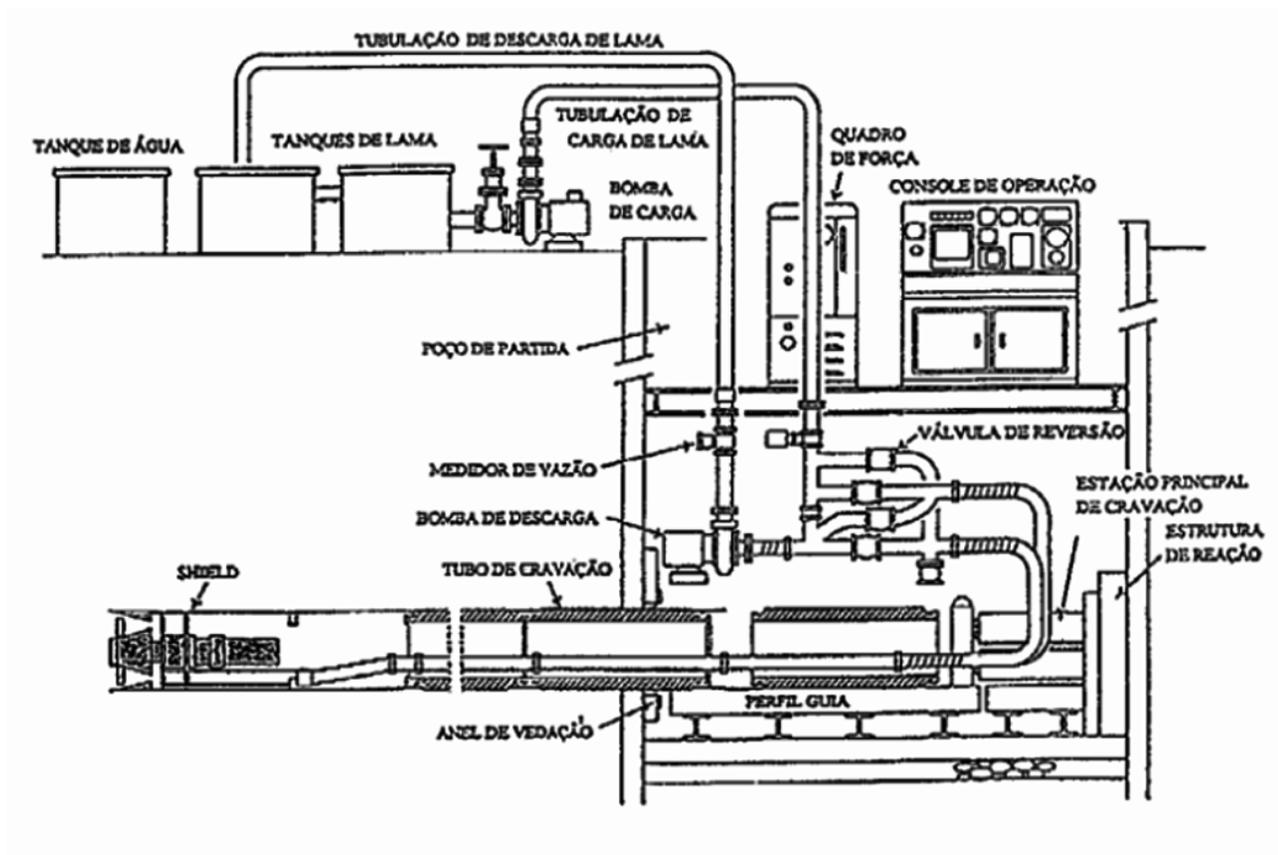


Figura 2 - Arranjo geral slurry pipe jacking

## ARRANJO GERAL

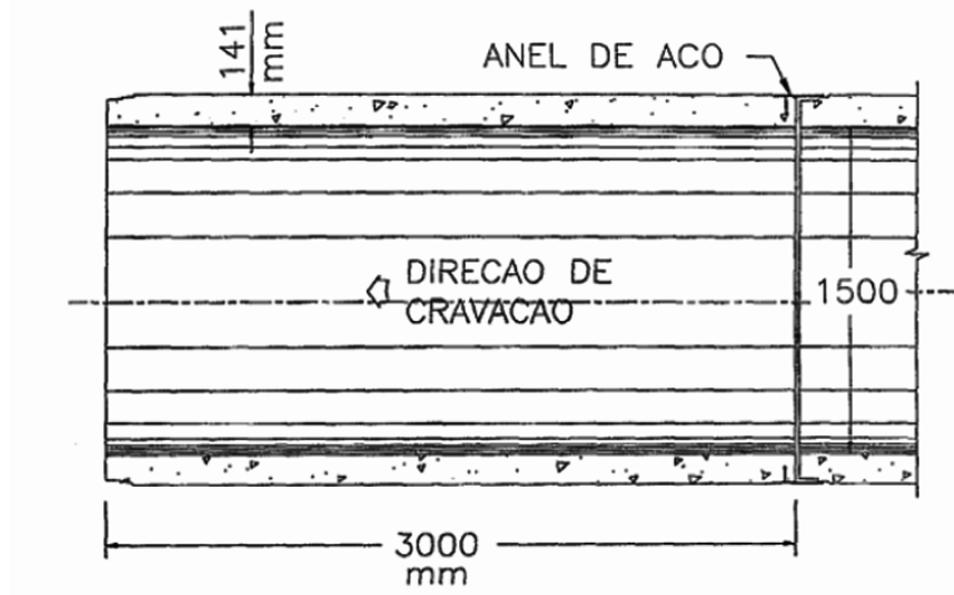


Figura 3 – Tubo de concreto armado para cravação

## MÉTODO

Cada tubo cravado movimentada toda a composição (shield mais tubos) que avança em direção ao poço de chegada.

Lama bentonítica através de orifícios localizados na cauda

Sistema de direcionamento

Inclinômetro e uma mira com raio laser

## PARÂMETROS ENVOLVIDOS

Torque da cabeça de escavação

Velocidade de avanço

Carga de cravação

Vazão e pressão de lama

Direcionamento

Posicionamento

## METODOLOGIA

### Curva de Reação do Maciço (CRM)

No caso de comportamento elastoplástico, a CRM apresenta duas regiões distintas:

O trecho linear: comportamento elástico-linear do solo

O trecho não linear: comportamento elasto-plástico do solo

Quando a pressão interna da abertura atinge  $P_I$  o maciço ao seu redor começa a plastificar

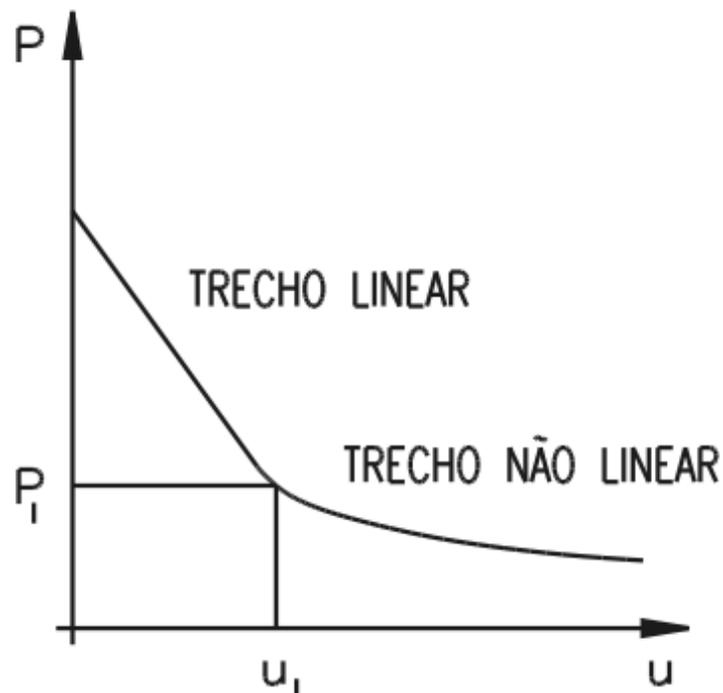


Figura 4 –Curva de reação do maciço para comportamento elasto-plástico

## **METODOLOGIA**

A estimativa dos esforços necessários à cravação de tubos consecutivos

Limite recalque: não produzir danos na superfície

Estimativa das pressões limites

Manter a frente de escavação estável

Os esforços de cravação

Determinação do coeficiente de atrito tubo-bentonita-solo



Couraça de Shield aguardando montagem



Shield EPB para execução de tubos cravados,  
detalhe de visão de corte

## ESTIMATIVA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS

Manutenção da estabilidade do maciço

Limites de danos causados às estruturas superficiais

Diretamente relacionado com a pressão de lama a ser aplicada na frente de escavação

Quanto maior for a pressão na frente de escavação, maiores serão as tensões normais do maciço sobre o revestimento.

Maiores serão também os esforços necessários para a cravação dos tubos, devido ao atrito.

## ESTIMATIVA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS

Dois conjuntos de parâmetros

- 1) Tensões na face do shield (determinação das pressões de lama a serem aplicadas);
- 2) Esforços de cravação da composição (shield + tubos de concreto).

Esforços de cravação

tensões do maciço e do atrito na interface tubo-bentonita.

## ESTIMATIVA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS

o esforço de cravação deve superar a resistência friccional do tubo com o solo, somado a resistência de penetração da frente cortante do shield.

Dependendo da extensão do túnel o atrito gerado pode chegar a valores que inviabilizam o processo.

Em maciços estáveis, a sobrecavação pode ser mantida ao longo de toda extensão do túnel

## ESTIMATIVA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS

Sobrescavação é limitado à solos estáveis.

Em solo instáveis

- Indução indesejável de recalques devido ao confinamento parcial.

Utilizando a bentonita como fluido estabilizante

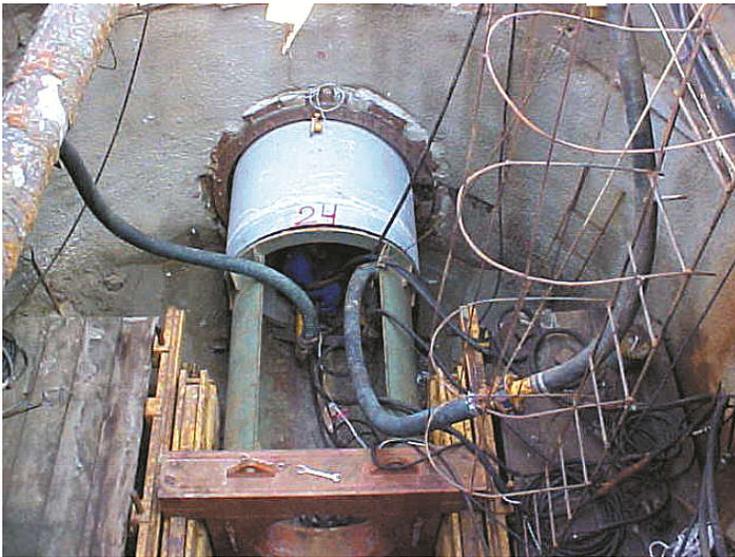
- coeficiente de atrito depende do limite de liquidez da suspensão

O atrito na interface tubo-bentonita é de difícil determinação

esforço depende do nível de tensões que o maciço apresenta durante o processo de cravação

## CÁLCULO DOS ESFORÇOS DE CRAVAÇÃO

Esforços de cravação máximo, mínimo e limitantes.



Cravação de tubo pré-moldado a partir do poço de emboque



Equipamento de monitoração remota da cravação

## CASO COLETOR TRONCO IPIRANGA

Os poços de visita (PV) números 9 e 8 deste coletor, localizado na Avenida Ricardo Jafet

PV 9 foi utilizado como poço de partida

PV 8 como poço de chegada

Diâmetro interno de 1,5 m

Equipamento que executa escavação de túneis com diâmetro de 1,792 m

Tubo de concreto com comprimento de 3m e parede com espessura de 141mm.

## CASO COLETOR TRONCO IPIRANGA

Profundidade variando entre 6m e 7m.

Poço de partida tem 6,5 m de diâmetro interno

Poço de chegada 3,9 m

Esforço máximo de cravação 6.000 kN

Unidade	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'$ (graus)	$c'$ (kPa)	S	Ko	$\mu$
Aterro de materiais diversos com predomínio de argila e silte arenoso, geralmente com pedregulhos, material de entulho e/ou matéria orgânica	16	25	10	1,5	1	0,2
Argila siltosa orgânica, muito mole, cinza escura e preta (Quaternário)	16	25	10	2	$1 - \text{sen } \phi$	0,1
Areia fina e média argilosa, com material orgânico marrom e cinza (Quaternário)	18	27	2	1	$1 - \text{sen } \phi$	0,3
Argila siltosa pouco arenosa, plástica, dura, cinza e amarela (Terciário)	19	22	50	2	1	0,1

Tabela 1 - Propriedades dos solos interceptados ao longo do traçado do túnel

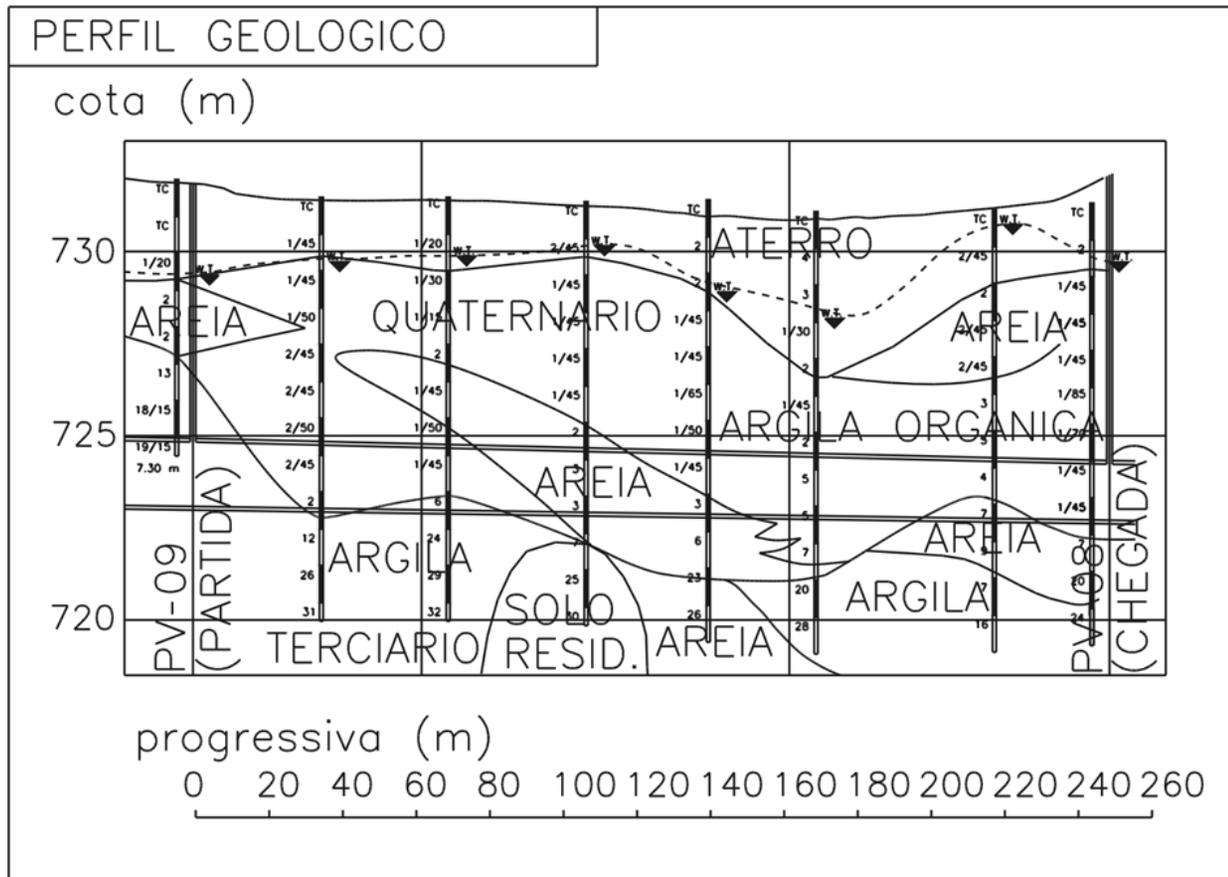


Figura 5 - Perfil geológico longitudinal entre PV9 e PV8

## CASO COLETOR TRONCO IPIRANGA

Esforço máximo de cravação 6.000 kN

Necessário enrijecer a estrutura do poço de partida

Tensões totais e efetivas calculadas no eixo do túnel definem as pressões de lama a serem aplicadas

## CASO COLETOR TRONCO IPIRANGA

Valores de esforço unitário mínimo por metro de tubulação entre 2kPa a 80kPa

O valor máximo de 80kPa corresponde à situação com escavação em trecho arenoso

Esforços de cravação acumulados crescem ao longo do trecho atingindo valor máximo de 9.335 kN

Reação máxima dos macacos hidráulicos é de 6.000 kN

Utilização de estações intermediárias de cravação dos tubos neste trecho

## Instrumentação

A estabilização das pressões na face de escavação minimiza o desenvolvimento de recalques.

Instrumentos de campo para avaliar o desempenho da construção do túnel

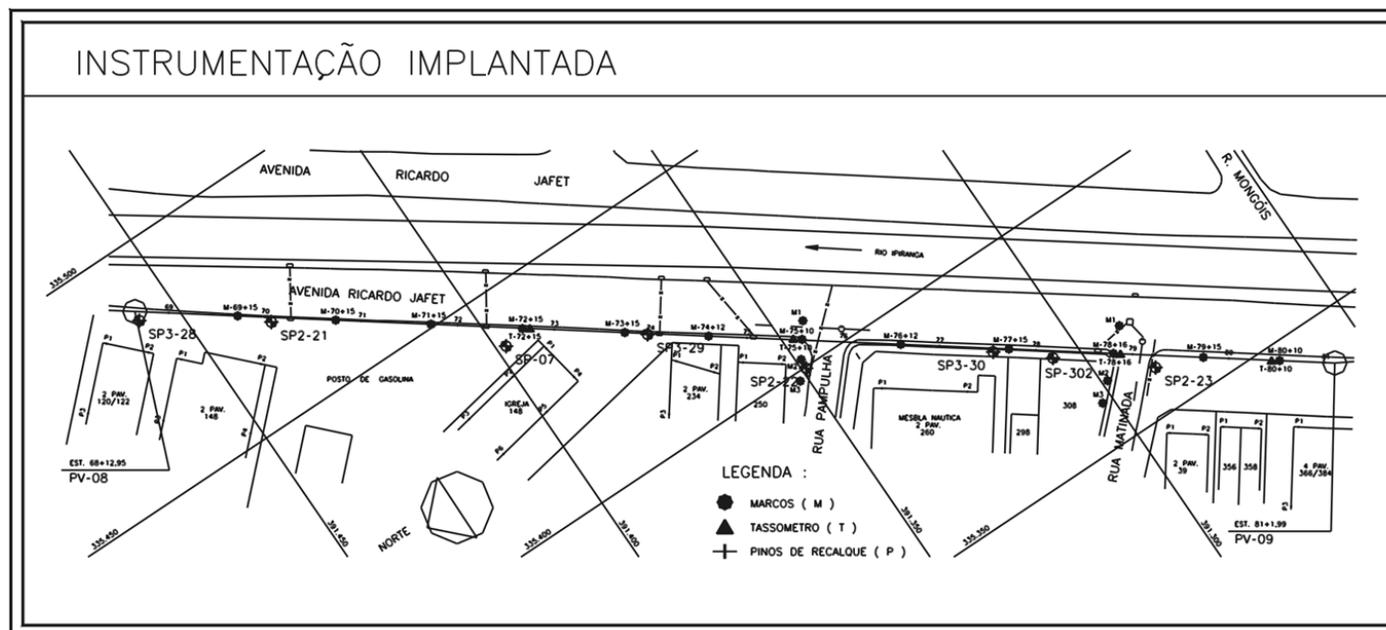


Figura 6 - Instrumentação implantada entre PV9 e PV8

## Instrumentação

Os recalques tendem-se a estabilizar a uma distância equivalente de duas a três vezes o diâmetro de escavação

A instrumentação superficial apresentou valores maiores de recalques que os tassômetros

Os volumes de recalques (% do volume de escavação) determinados foram de 6% e 4,4% para as progressivas 49m e 112,4 m.

## Instrumentação

O maciço arenoso sofreu maior alívio de tensões que o maciço argiloso

Instrumento	Progressiva (m)	recalque superficial (mm)	Tensão efetiva* (KPa)	Coefficiente de atrito
M77+15	72	52,8	10,44	0,101
Poste 7	78	58,2	9,85	0,105
M76+12	93,9	46,1	11,11	0,096
Poste 6	100	42,7	11,56	0,094
M75+10	112,4	12,1	32,44	0,04
Poste 5	130,9	23,1	15,76	0,074
M74+12	135	23	15,8	0,074
M73+15	152	16,8	18,48	0,065
MÉDIA		34,4	12,9	0,086

Tabela 2 -  
Retroanálise  
do coeficiente  
de atrito para  
a areia

## Instrumentação

Instrumento	Progressiva (m)	recalque superficial (mm)	Tensão efetiva* (KPa)	Coefficiente de atrito
Poste 4	167	13,5	42,97	0,116
M72+15	172	12,5	45,21	0,111
M71+15	192	11,7	47,01	0,107
Poste 3	196,9	10,3	50,15	0,101
M70+15	212,8	4,9	62,27	0,083
Poste 2	221,4	6,6	58,45	0,088
MÉDIA		9,9	51,05	0,099

Tabela 3 - Retroanálise do coeficiente de atrito para a argila



Vista da superfície com Pipe Jacking em execução



Vista de estoque de tubos de concreto Pré-moldados, para Pipe Jacking



Detalhe do encaixe entre tubos para Pipe Jacking e entre segmentos de tubo cravado

## ADUTORA TRAVESSIA SOB O RIO TIETÊ

Extensão ~ 120m  
Cobertura ~ 7,0m  
Diâmetro de 1,80m



## ADUTORA TRAVESSIA SOB O RIO TIETÊ

Montagem da estrutura no poço de emboque



## ADUTORA TRAVESSIA SOB O RIO TIETÊ

Equipamento utilizado na escavação





## ADUTORA TRAVESSIA SOB O RIO TIETÊ

Equipamento iniciando a escavação



## ADUTORA TRAVESSIA SOB O RIO TIETÊ

Cravação dos tubos de concreto



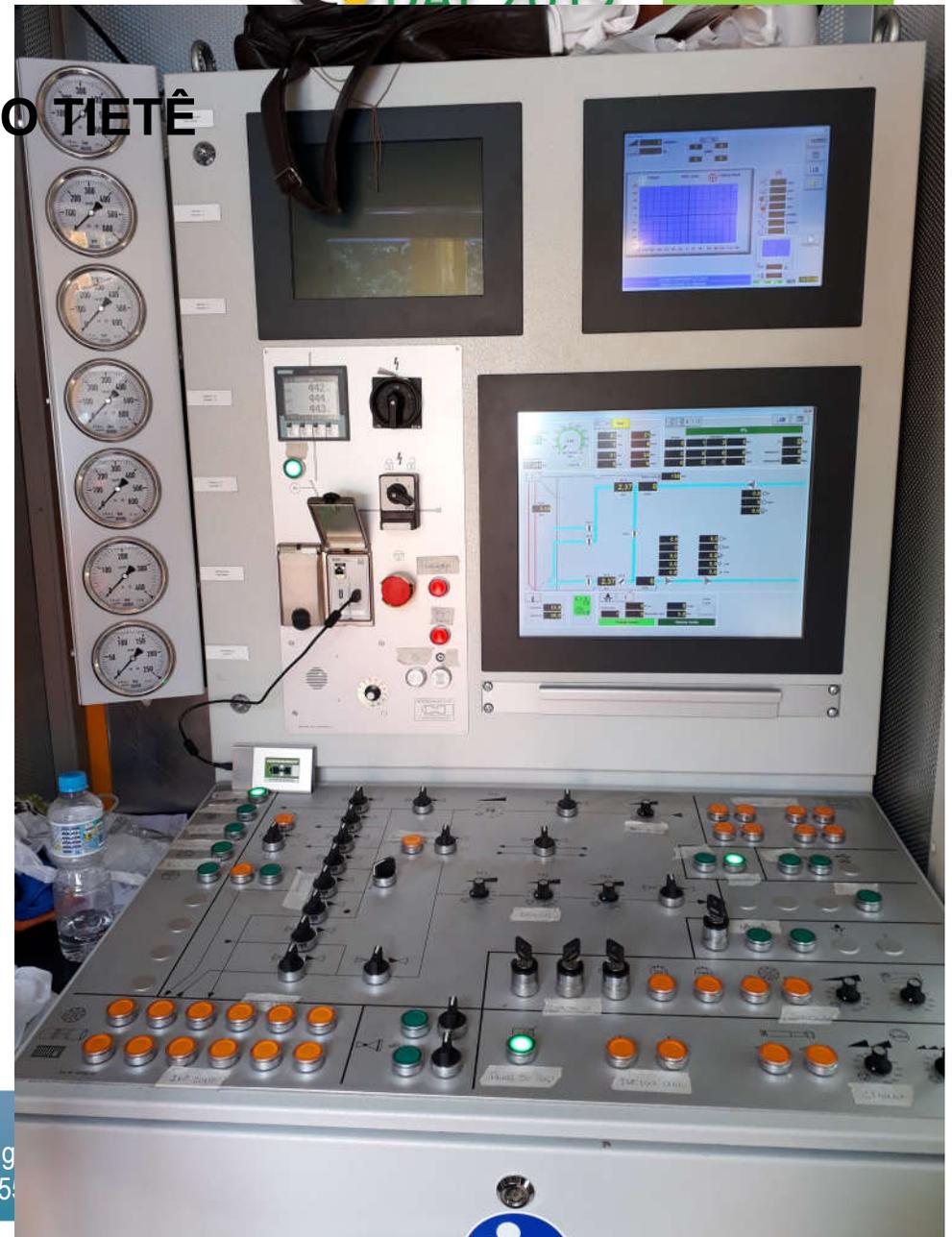
## ADUTORA TRAVESSIA SOB O RIO TIETÊ

Retirada do material da escavação – caçambas + ponte rolante



## ADUTORA TRAVESSIA SOB O RIO TIETÊ

Cabine de controle do equipamento



## ADUTORA TRAVESSIA SOB O RIO TIETÊ

Descida da tubulação pela ponte rolante



## ADUTORA TRAVESSIA SOB O RIO TIETÊ



Vídeo com a Chegada do  
equipamento no poço de  
desemboque



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estimativas dos parâmetros operacionais se mostraram bastante satisfatória quando comparada com os dados de desempenho de campo

O controle da pressão aplicada à lama é de difícil controle, uma vez que dependem das características do solo escavado, da mistura com o solo na câmara de pressurização, da vazão de descarga da lama, torque e rotação da cabeça desagregadora, velocidade de avanço do shield

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sobrescavação reduz consideravelmente o contato entre os tubos e o maciço

A injeção de lama serve também para minimizar o desenvolvimento de zonas plásticas no seu contorno

Composição da lama é fator de maior importância para redução dos esforços de cravação