

Mini e micro túneis com shield (tatução) e revestimento em tubo cravado (slurry pipe jacking)



RESUMO

O slurry pipe jacking é um método de escavação subterrâneo, desenvolvido no início da década de 1980, para túneis de pequeno diâmetro ($< 3\text{m}$), resultante da combinação da técnica de 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.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia simplificada para a determinação dos parâmetros operacionais para o slurry pipe jacking, associados a parâmetros de desempenho para túneis em solo. No desenvolvimento do trabalho dá-se ênfase à definição de dois requisitos básicos de projeto: estimativa dos esforços de cravação necessários para a instalação dos tubos consecutivos e a magnitude dos recalques induzidos pela construção do túnel. Estes são os requisitos que definem a capacidade do sistema de cravação, espessura dos tubos cravados e o potencial de danos induzidos nas estruturas superficiais e utilidades enterradas.

MARCELO MASSAKI MATSUI

ENGENHEIRO PELA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - EPUSP

ROBERTO KOCHEN

DOUTOR EM ENGENHARIA, PROFESSOR DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS E FUNDAÇÕES (EPUSP), DIRETOR DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÕES CIVIS DO INSTITUTO DE ENGENHARIA E DIRETOR DA GEOCOMPANY TECNOLOGIA, ENGENHARIA & MEIO AMBIENTE

INTRODUÇÃO

Com o crescimento dos centros urbanos, tornou-se necessário a melhoria e a expansão da rede de utilidades públicas (água, esgoto, eletricidade, telefonia etc.). Em áreas densamente edificadas, com grande ocupação do espaço subterrâneo, a execução de obras subterrâneas em valas a céu aberto causa impactos sócio-econômico-ambientais cada vez maiores. Por menores e de pouca profundidade que sejam, obras subterrâneas a céu aberto causam enormes transtornos nos centros urbanos e nas vias principais, em especial na interferência com o trânsito naturalmente intenso. Por esse motivo, obras com custos diretos extremamente modestos inviabilizam-se devido aos altos custos sociais inerentes aos atrasos e perturbações que ocasionam a milhares de pessoas, muitas vezes por períodos prolongados.

Dentro deste panorama, a tecnologia do slurry pipe jacking tornou-se atrante frente à métodos tradicionais como a solução em vala a céu aberto, principalmente para a construção de novas redes de esgotos, por minimizar os impactos e oferecer maior produtividade com menor risco técnico e econômico.

Justifica-se assim, o interesse de se intensificar os estudos e as pesquisas sobre esta tecnologia que, apesar de estar sendo aplicada em algumas obras, ainda carece de suporte teórico capaz de estimar melhor as variáveis operacionais do sistema de cravação e suporte da frente de escavação, para os quais este trabalho se propõe contribuir.

MÉTODO

Na concepção do método são previstos poços de partida e chegada. Os primeiros além de serem utilizados como poços de serviço, para acesso dos equipamentos de escavação, são concebidos de modo a mobilizar os esforços de cravação dos tubos de concreto. Os poços de chegada são utilizados para retirada do shield e posteriormente como poços de visita.

O processo tem início com a escavação do solo, que é desagregado e triturado na cabeça cortante cujo esquema é indicado na figura 1. A cabeça cortante consiste numa peça cônica dotada de pás na extremidade, que roda movida por uma engrenagem elíptica, produzindo durante a rotação uma excentricidade do cone. O cone tritura as partículas de maiores dimensões contra a parede interior cilíndrica do escudo. Os fragmentos, quando atingem as dimensões apropriadas, são conduzidos para um compartimento estanque e isolado do restante do túnel, localizado na parte frontal do shield. Esse compartimento frontal é pressurizado com o bombeamento de lama bentonítica que garante o equilíbrio das pressões da face de escavação. Além deste equilíbrio, a lama tem a função de transportar o material escavado até tanques de decantação localizados na superfície. Após a separação dos sólidos em suspensão nestes tanques, a lama volta a ser bombeada para o sistema. O arranjo geral do slurry pipe jacking é apresentado na figura 2.

Figura 1 - Cabeça cortante desagregadora

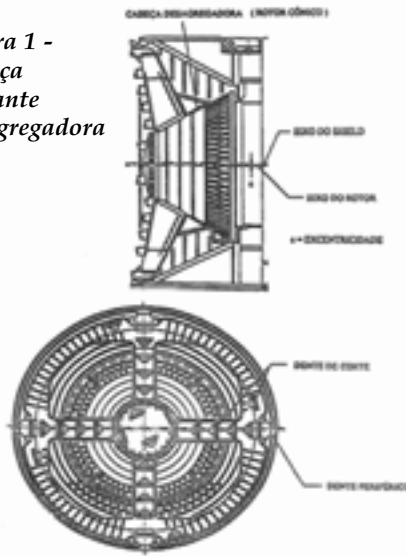
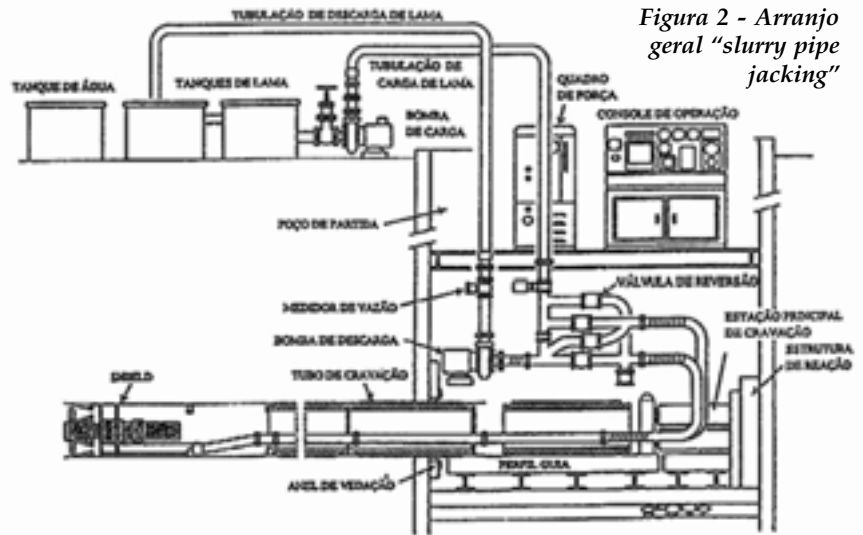


Figura 2 - Arranjo geral "slurry pipe jacking"



Simultaneamente a escavação e o transporte do material escavado, é feita a cravação dos tubos de concreto (figura 3) através de pistões hidráulicos localizados no poço de partida. Cada tubo cravado movimenta toda a composição (shield mais tubos) que avança em direção ao poço de chegada. Para minimizar os esforços de cravação e conseqüentemente o atrito na interface tubo-macijo, bombas instaladas na superfície injetam lama bentonítica através de orifícios localizados na cauda do shield e nos tubos de concreto.

O sistema de direcionamento e posicionamento é constituído por um inclinômetro e uma mira com raio laser localizados na parte frontal do shield. Este por ser articulado possibilita a correção da sua rota.

Todos os parâmetros envolvidos na operação do slurry pipe jacking (torque da cabeça de escavação, velocidade de avanço, carga de cravação, vazão e pressão de lama, direcionamento, posicionamento etc.) são controlados e comandados de uma cabine de operação localizada junto ao poço de partida.

METODOLOGIA

A metodologia para atingir o objetivo proposto consiste basicamente de uma solução analítica que permite associar os esforços de cravação, com as pressões de lama e deslocamentos induzidos do macijo. Os procedimentos adotados usualmen-

te são essencialmente empíricos e, como tal, não permitem otimizações com retroanálises do desempenho de campo. Para superar este problema, foram utilizados os conceitos da Curva de Reação do Macijo (CRM), para associar os esforços de cravação com as tensões do macijo e os deslocamentos. A teoria da elasto-plasticidade, expansão e colapso de cavidades, fornece a ligação entre os esforços aplicados e deslocamentos associados, para problemas de simetria axial (túnel) e simetria esférica (frente de escavação). O modelo constitutivo elasto-plástico, com queda de resistência após o pico, foi adotado juntamente com o critério de ruptura

de Mohr-Coulomb, com fluxo plástico não associado.

No caso de comportamento elasto-plástico, a CRM apresenta duas regiões distintas, como mostra a figura 4. O trecho linear corresponde ao comportamento elástico-linear do solo e o trecho não linear final corresponde ao comportamento elasto-plástico do solo. Para este modelo de comportamento, quando a pressão interna da abertura atinge P_1 o macijo ao seu redor começa a plastificar e a CRM passa a ser realmente curva.

Os procedimentos descritos neste artigo pretendem possibilitar a estimativa dos esforços necessários à cravação de tubos consecutivos, limitando-se a magnitude dos recalques ou levantamentos máximos a níveis toleráveis, seja para não produzir danos na superfície ou na subsuperfície ou seja para afastar o risco de ruptura do macijo, com plastificação exagerada deste. Com estes deslocamentos definidos é possível determinar, através do modelo elasto-plástico, quais as tensões internas (máximas e mínimas) nas cavidades esféricas ou cilíndricas, associadas àqueles deslocamentos. Tais tensões definem uma estimativa das pressões limites que devem ser aplicadas na lama para manter a frente de escavação estável, bem como as tensões do solo que interagem com o tubo, a partir da qual pode-se estimar os esforços de cravação, através da determinação do coeficiente de atrito tubo-bentonita-solo.



Figura 3 - Tubo de concreto armado para cravação

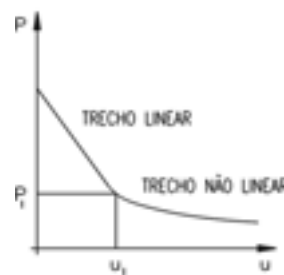


Figura 4 - Curva de reação do macijo para comportamento elasto-plástico



Courosa de Shield aguardando montagem

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



ESTIMATIVA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS

O objetivo principal dos parâmetros operacionais diz respeito à manutenção da estabilidade do maciço durante a construção do túnel e dos limites de danos causados às estruturas superficiais e subsuperficiais. No método slurry pipe jacking o controle dos ítems citados acima está diretamente relacionado com a pressão de lama a ser aplicada na frente de escavação, que garante a estabilidade da escavação e, conseqüentemente, as perdas de solo pela frente de escavação, minimizando assim os recalques induzidos pela escavação. No entanto, deve-se lembrar que a mesma pressão de lama está também relacionada com a relaxação das tensões do maciço, de modo que, quanto maior for a pressão na frente de escavação, maiores serão as tensões normais do maciço sobre o revestimento. Como conseqüência, maiores serão também os esforços necessários para a cravação dos tubos, devido ao atrito. Deve-se lembrar que estes esforços estão diretamente relacionados aos deslocamentos dos poços de partida do sistema, à estrutura de reação, à capacidade de propulsão dos pistões e à resistência dos tubos de concreto.

Basicamente dois conjuntos de parâmetros devem ser determinados durante a sua operação, que designamos como parâmetros operacionais, e que são: 1) tensões na face do shield (determinação das pressões de lama a serem aplicadas); 2) esforços de cravação da composição (shield + tubos de concreto).

As tensões na face do shield dependem basicamente das condições de empuxo atuantes que determinam as pressões de lama a serem aplicadas para manter a frente estável.

Os esforços de cravação dos tubos podem ser determinados através da

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

Durante a operação do slurry pipe jacking, o esforço de cravação deve superar a resistência friccional do tubo com o solo, somado a resistência de penetração da frente cortante do shield. Se a escavação for executada com suporte fluido pressurizado, a determinação do esforço de cravação deverá levá-la em consideração.

A pressão aplicada na câmara de suspensão de bentonita serve para equilibrar as tensões do maciço, mantendo a frente estável. A estabilização da frente de escavação depende muito da formação do cake, que por sua vez depende da concentração de bentonita que é função do tipo de maciço escavado.

A outra parcela, além do esforço de cravação originado na face do shield, é a resultante do atrito gerado pelo contato do tubo e do shield com o maciço.

Dependendo da extensão do túnel a ser executado, o atrito gerado pode chegar a valores que inviabilizam o processo. O atrito na interface (M) pode ser reduzido através de sobrecavação do maciço ou através do uso de lubrificante. Em maciços estáveis, a sobrecavação pode ser mantida ao longo de toda extensão do túnel, apesar do atrito na interface ocorrer somente na parte inferior do tubo. O artifício da sobrecavação, entretanto, é limitado à solos estáveis. Em solos instáveis, a sobrecavação inviabiliza a performance necessária para o processo de cravação, além da indução indesejável de recalques devido ao confinamento parcial. A utilização de lama bentonítica para lubrificação, nestes casos, diminui o atrito na interface, além de estabilizar a escavação.

Segundo Stein, et al. (1989), quando se utiliza bentonita como fluido estabilizante e lubrificante da interface maciço-tubo, o coeficiente de atrito depende

do limite de liquidez da suspensão, situando-se na faixa de $0,1 < \mu < 0,3$.

O atrito na interface tubo-bentonita é de difícil determinação e depende basicamente das condições de cravação, das propriedades dos solos e do tempo de formação da película de bentonita.

Na metodologia proposta, adotando-se o valor de μ , o atrito na interface poderá ser calculado, determinando-se assim o esforço ortogonal ao tubo. Este esforço depende do nível de tensões que o maciço apresenta durante o processo de cravação e será abordado a seguir.

CÁLCULOS DOS ESFORÇOS DE CRAVAÇÃO

Com as tensões do maciço analisadas para as três condições de escavação, podemos determinar os esforços de cravação para o slurry pipe jacking. Vamos calcular os esforços de cravação para três condições: esforços de cravação máximo, mínimo e limitantes.

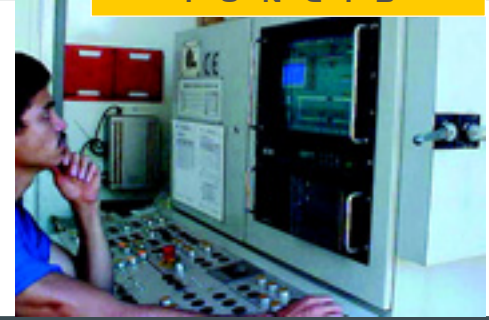
Os esforços máximos de cravação correspondem às tensões máximas no maciço, que foram definidas como as tensões horizontais totais *in situ*, considerando-se situação de empuxo em repouso. Considerando o maciço homogêneo e isotrópico, adotou-se a hipótese de que as tensões máximas não seriam superiores às tensões horizontais totais *in situ*, que evitariam uma condução "passiva", e conseqüentemente o levantamento do terreno superficial. Esta tensão foi também considerada para o cálculo da parcela do esforço de cravação devido ao atrito gerado durante a execução do túnel.

Os esforços mínimos de cravação são determinados através de limitações de distorções transversais máximas (1:450) na superfície do terreno ou por recalques que levam à plastificação do maciço. Após o cálculo dos deslocamentos, adota-se como deslocamento máximo o me-



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

Equipamento de monitoração remota da cravação



nor valor daqueles obtidos através dos dois critérios. Determinado o deslocamento máximo, determina-se as pressões correspondentes através da CRM, que multiplicadas pelo coeficiente de atrito tubo-bentonita, fornecem as tensões de cisalhamento que atuam na periferia dos tubos. A integral destas tensões fornecem os esforços mínimos de cravação que deverão se desenvolver.

CASO DO COLETOR TRONCO IPIRANGA

Neste item vamos apresentar a estimativa de parâmetros operacionais de slurry pipe jacking para o caso histórico do coletor tronco Ipiranga, do Projeto de Despoluição do Tietê elaborado pela Sabesp. O trecho escolhido para se fazer a determinação dos parâmetros operacionais foi o entre os poços de visita (PV) números 9 e 8 deste coletor, localizado na Avenida Ricardo Jafet, com uma extensão aproximada de 248m. O PV 9 foi utilizado como poço de partida e o PV 8 como poço de chegada. Trata-se de um trecho densamente ocupado por edificações comerciais e residenciais onde a limitação dos níveis de recalques é muito importante.

O túnel projetado possui diâmetro interno de 1,5 m e foi escavado com um equipamento de slurry pipe jacking que executa escavação de túneis com diâmetro de 1,792 m, considerando-se sobrecavação do equipamento de 5mm. O tubo de concreto utilizado tem comprimento de 3m e parede com espessura de 141mm.

O eixo do túnel situa-se a uma profundidade variando entre 6m e 7m. A superfície do terreno apresenta cota variando entre 732m e 733m.

O poço de partida tem 6,5 m de diâmetro interno acabado e o

Unidade	γ (kN/m ³)	ϕ' (graus)	c' (kPa)	S	Ko	μ
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-sen ϕ	0,1
Areia fina e média argilosa, com material orgânico marrom e cinza (Quaternário)	18	27	2	1	1-sen ϕ	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

de chegada 3,9 m. O poço de partida tem maiores dimensões devido o sistema de cravação que fica instalado neste.

O subsolo ao longo do traçado foi investigado através de sondagens de simples reconhecimento, com determinação do SPT. O perfil longitudinal do subsolo é apresentado na figura 5.

A descrição completa das unidades interceptadas pela execução do túnel, bem como suas respectivas propriedades estão apresentadas na tabela 1. As propriedades das unidades foram estimadas com base em campanhas de prospecção em outros locais e projetos semelhantes, e devem ser vistos como propriedades médias.

O nível do lençol freático foi estimado através do nível d'água encontrado nos furos de sondagem, e apresentaram-se entre 0,5 m e 3m de profundidade.

O esforço máximo de cravação que o conjunto de macacos hidráulicos pode mobilizar é de 6 000 kN, que é equilibrado no poço de partida, por reação na pa-

rede oposta ao avanço do pipe jacking. Por se tratar de poços com flexibilidade elevada, a aplicação das cargas de reação tornou-os suscetíveis a deslocamentos. Para evitar que esses deslocamentos se tornassem excessivos e prejudicassem o alinhamento de toda a composição, uma vez que o alinhamento é dado por orientação de um laser instalado no poço de partida, foi necessário enrijecer a estrutura do poço de partida, reduzindo os deslocamentos induzidos pela carga de reação, a valores aceitáveis.

As tensões totais e efetivas calculadas no eixo do túnel, assim obtidas, definem as pressões de lama a serem aplicadas para manter a frente de escavação estável e ao mesmo tempo evitar a pressurização excessiva da frente, que poderia causar levantamento do terreno. As tensões efetivas foram utilizadas para o cálculo dos esforços de cravação. A utilização das tensões efetivas para o cálculo dos esforços de cravação é razoável, uma vez que foi admitido que após a passagem da frente de escavação pressurizada pela lama bentonítica, o maciço sofresse processo de depressurização, que estabeleceria uma rede de percolação d'água do subsolo até atingir um novo equilíbrio. As pressões neutras apresentadas, correspondem ao nível de água encontrado nas sondagens executadas ao longo do traçado do túnel.

Os valores de recalque, volume de recalque e larguras de

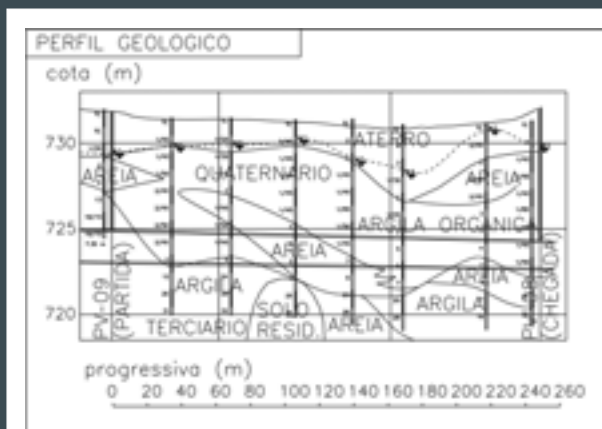


Figura 5 - Perfil geológico longitudinal entre PV9 e PV8

subsistência ao longo do trecho, utilizando-se a metodologia apresentada, para o limite de danos moderados.

Os valores de esforço unitário mínimo por metro de tubulação ao longo do trecho situam-se entre 2kPa a 80kPa. O valor mínimo de 2kPa corresponde à situação em que as tensões efetivas mínimas são nulas, e o esforço unitário neste caso, é devido somente ao atrito que se desenvolve entre o solo e a base da tubulação, devido ao seu próprio peso. O valor máximo de 80kPa corresponde à situação com escavação em trecho arenoso ($\mu=0,3$).

Os valores de esforços de cravação acumulados entre os poços crescem ao longo do trecho, atingindo o valor máximo de 9 335 kN. A capacidade de reação máxima dos macacos hidráulicos é de 6 000 kN, e portanto deveria se antecipar a utilização de estações intermediárias de cravação dos tubos neste trecho. Como se trata de um valor extremo (referido a K_0), a exclusão da utilização da estação intermediária foi definida pela carga de cravação obtida pelo critério do limite de danos moderados, que é menor que 6 000 kN.

Instrumentação

No slurry pipe jacking, a estabilização das pressões na face de escavação, associado a sobrecavação mínima e a instalação imediata do revestimento, minimiza o desenvolvimento de recalques. Para verificar esta premissa de projeto, foram implantados instrumentos de campo para avaliar o desempenho da construção do túnel e a estimativa de parâmetros operacionais. Na figura 6 é apresentado o croqui com a instrumentação implantada.

Os recalques superficiais no eixo do túnel (marcos de recalques superficiais

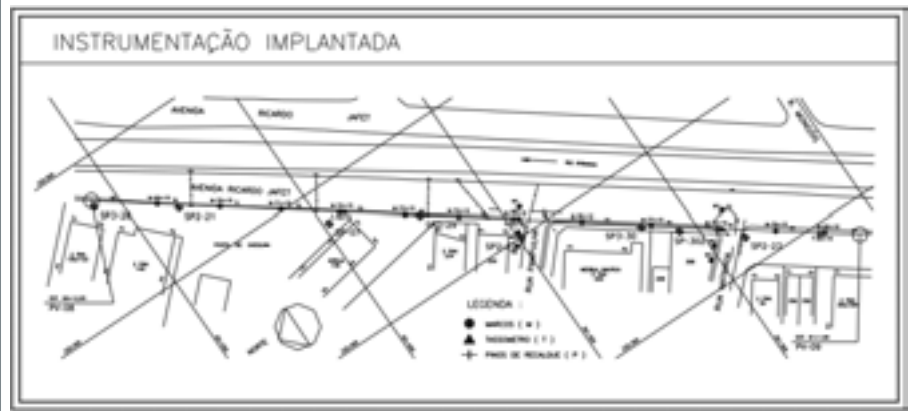


Figura 6 - Instrumentação implantada entre PV9 e PV8

e em pinos de recalque instalados nos postes elétricos próximos ao eixo do túnel), juntamente com os recalques subsuperficiais no eixo do túnel (tassômetros). Os recalques medidos dizem respeito à deslocamentos obtidos durante a passagem da frente de escavação sob a seção instrumentada e a deslocamentos estabilizados manifestados após a passagem da frente de escavação.

Os recalques subsuperficiais (tassômetros) no eixo do túnel versus a distância da face de escavação para a seção instrumentada são apresentados para uma situação com a seção em areia e em argila. Comparando os recalques medidos, observamos que o tassômetro instalado na areia, apesar da mesma ordem de grandeza, apresentou uma velocidade de recalque menor que o tassômetro instalado na argila. Usualmente os recalques tendem-se a estabilizar a uma distância equivalente de duas a três vezes o diâmetro de escavação do túnel. Ao observamos que os tassômetros continuaram a recalcar, apesar do distanciamento da frente de escavação para o instrumento apresentar valores elevados de 80m e 140m, respectivamente para a argila e areia. O trecho vertical que apresenta a curva de recalques, indica o instante em que o shield desembocou no poço de chegada.

Comparando os recalques medidos dos tassômetros e dos marcos e pinos

superficiais, observou-se que a instrumentação superficial apresentou valores maiores de recalques que os tassômetros, apesar deste último estar instalado próximo ao teto da seção de escavação. O maior recalque apresentado pela instrumentação superficial, pode estar associada a alteração do contorno hidráulico, que gera deformações no maciço por adensamento.

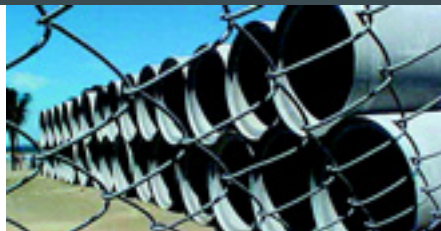
A instrumentação instalada transversalmente ao eixo do túnel fornece o ajuste de curva de Gauss para a bacia de recalque. Os volumes de recalques (% do volume de escavação) determinados foram de 6% e 4,4%, respectivamente para as progressivas 49m e 112,4 m. Estes valores são maiores que os previstos pelo limite de danos moderados.

Os valores previstos para os recalques superficiais são apresentados em suas respectivas progressivas. A magnitude dos recalques superficiais medidos no trecho de escavação em areia, aproximadamente da progressiva 60m a 100m, foram maiores que os previsto pelo critério de limite de instabilidade, provavelmente devido a uma maior sobrecavação do maciço arenoso, associada às altas vazões de lama.

A partir dos dados retroanalizados apresentados nas tabelas 2 e 3, observamos que os valores de coeficiente de atrito da areia e da argila, em média ficaram muito próximos. O maciço are-



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



noso sofreu maior alívio de tensões que o maciço argiloso, que conseqüentemente transmitiu menores esforços para os tubos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi apresentar uma metodologia simplificada para estimativa dos parâmetros operacionais do slurry pipe jacking. As considerações apresentadas a seguir são simplesmente uma tentativa de compreender melhor as variáveis operacionais que envolvem a utilização desta tecnologia, considerando-se o curto período de tempo que esta técnica de execução de túneis vem sendo utilizada no país.

O modelo analítico utilizado permite uma rápida caracterização do maciço, apresentando as condições de carregamento e a interação solo-estrutura ao redor do túnel, suplementando os métodos de projeto empíricos quando uma informação geotécnica mais detalhada é disponível. Podem também incorporar informações obtidas da instrumentação de campo, que proporcionam a otimização do projeto durante a sua construção.

As estimativas dos parâmetros operacionais apresentadas foram bastante satisfatória quando comparada com os dados desempenho de campo, apesar da ausência de testes laboratoriais referentes à determinação dos parâmetros do solo e principalmente da composição da lama bentonítica utilizada para estabilização da frente de escavação e lubrificação do perímetro dos tubos.

A pressão da face do shield, ou pressão aplicada à lama bentonítica, apresentou-se maior que os valores previstos. Provavelmente a pressão média da face é menor que a medida, isto devido, provavelmente a leituras superestimadas da pressão pelo equipamento, uma vez que as pressões foram maiores (em média 50kPa) que a máxima prevista na condição de empuxo em repouso, a despeito do levantamento de terreno que não foi observado. O contro-

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

*calculado a partir da curva de reação do maciço

Tabela 2 - Retroanálise do coeficiente de atrito para a areia

le 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, enfim, variáveis geotécnicas e operacionais que influem na sua definição. A metodologia apresentada propõe uma referência para as regras operacionais, que deverão ser determinadas durante a execução do túnel.

Com relação à lubrificação da composição, dependendo do solo encontrado durante a escavação, é necessária para reduzir o atrito produzido na interface tubo-solo. O diâmetro do shield utilizado é ligeiramente maior que o diâmetro externo dos tubos. Esta sobrecavação reduz consideravelmente o contato entre os tubos e o maciço, desde que a escavação se mantenha estável. No caso de escavação instável a injeção de lama serve também para minimizar o desenvolvimento de zonas plásticas no seu contorno. Desta maneira a composição da lama é de maior importância, para que ocorra a formação da película lubrificante e, conseqüentemente, a redução dos esforços de cravação, que é diretamente proporcional ao valor do coeficiente de atrito da interface. A especificação correta de um programa de injeção para lubrificação garantirá a sua eficiência.

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

*calculado a partir da curva de reação do maciço

Tabela 3 - Retroanálise do coeficiente de atrito para a argila

A maximização do comprimento de cravação é uma meta a ser atingida, mas que requer uma maior campanha de instrumentação que garanta informações detalhadas e confiáveis para a otimização do projeto. Neste aspecto, a utilização de uma equipe altamente treinada

é essencial, sem o qual esta tecnologia de escavação não atingirá o desempenho esperado. ■

BIBLIOGRAFIA

1. Anagnostou, G. e Kovári, K., 1996: Face Stability in Slurry and EPB Shield Tunneling, Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London, pp 453-458.
2. Branco, P. Jr., Negro, A. Jr., Coutinho, P. T., (1990): Recalques de superfície, qualidade construtiva de túneis e danos em edificações, Singeo 90.
3. Brown, E. T., et al., 1983: Ground Response Curves for Rock Tunnels, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109 n° 1, pp 15-38.
4. Coutinho, P. T. & Negro, A. Jr, (1995) - Túneis não tripulados - Parte 2: O Slurry Pipe Jacking. TURB - Simpósio sobre Túneis Urbanos.
5. Einstein, H. H. & Schwartz, C. W., (1979) - Simplified Analysis for Tunnel Supports, Journal of the Geotechnical Engineering Division.
6. Heinz, H. H., Jr., 1988: Large Cross Section Tunnels in Soft Ground-Phd Thesis, University of Alberta.
7. Jancsecz, S. & Steiner, W., (1994) - Face Support for a large Mix-Shield in heterogeneous ground conditions. Proceed Tunnelling'94, pp 531-550.
8. Milligan, G. & Norris, P., (1996) - Site-based research in pipe jacking - objectives, procedures and a case history, A Supplement to Tunnelling and Underground Space Technology.
9. Milligan, G. & Norris, P., (1992) - Pipe Jacking Research Results and Recommendations - University of Oxford, Department of Engineering Science.
10. Milligan, G. & Norris, P., (1992): Frictional Resistance of jacked concrete pipes at full scale, Proceedings International Conference No DIG Paris - No trenches in Town, Henry & Mermet, Balkema, Rotterdam.
11. Stein, D., Möllers, K. & Bielecki, R., (1989) - Microtunneling Installation and Renewal of Nonman - Size Supply and Sewage Lines by the Trenchless Construction Method.