

RECALQUES SUPERFICIAIS GERADOS POR UM MINI-TÚNEL EM SOLO RESIDUAL ARENOSO*

Superficial Settlements Caused by a Small Diameter Tunnel Excavated in a Residual Sandy Soil

por

SÉRGIO AUGUSTO BARRETO DA FONTOURA**

MARIA CLÁUDIA BARBOSA***

RESUMO – Este trabalho apresenta um caso histórico de um túnel de pequeno diâmetro, baixa cobertura de solo e escavado na cidade de São Paulo, Brasil. Este túnel foi escavado manualmente tendo um shield como elemento de suporte temporário do teto. Revestimento definitivo consistia de anéis segmentados de 60 cm de comprimento formados por 3 segmentos pré-moldados de concreto. De modo a avaliar a eficiência do método construtivo em manter os deslocamentos dentro dos limites toleráveis, foi projetado um sistema de instrumentação consistindo de monumentos superficiais, extensômetros múltiplos, inclinômetros e piezômetros. O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma análise dos recalques superficiais causados pela escavação deste túnel. A previsão do comportamento foi realizada através de métodos empíricos e semi-empíricos e esta previsão é comparada aos resultados das medições de campo.

SYNOPSIS – This paper presents a case-history of a shallow, small-diameter tunnel driven in the city of São Paulo, Brasil. This tunnel was excavated manually with a shield providing temporary protection for the roof. Final lining consisted of 60 cm-long rings formed by 3 segments of pre-cast concrete. An instrumentation consisting of surface monuments, borehole extensometers, inclinometers and piezometers was designed in order to assess the efficiency of the construction method in keeping the displacements within tolerable magnitude. The aim of this paper is to present an analysis of the superficial settlements caused by the tunnel excavation. This prediction of tunnel behaviour was carried out through both empirical and semi-empirical methods. In conclusion, this prediction is compared to the measured displacements.

1 – INTRODUÇÃO

A crescente demanda de serviços básicos (transporte, saneamento) por parte da população dos grandes centros urbanos tem exigido um aumento na construção de túneis em áreas densamente ocupadas. A execução destes túneis provoca deslocamentos na massa de solo a seu redor que poderão, a depender de sua ordem de grandeza, afetar o bom funcionamento de instalações existentes nas proximidades.

* Manuscrito recebido em Setembro de 1984. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

** Professor Assistente, Departamento de Eng.^a Civil, PUCRJ

*** Engenharia Civil, Ph. D., A.M. ASCE

Nestas circunstâncias, a previsão dos recalques gerados na superfície pela escavação do túnel tornou-se um aspecto relevante do projeto.

Este interesse crescente deu origem ao surgimento, nos últimos quinze anos, de diversos métodos de previsão de recalques superficiais visando, sobretudo, o caso de escavações em solos argilosos. Devido à complexidade dos fatores que condicionam os deslocamentos associados a este tipo de obra, todos os métodos propostos apresentam um alto grau de empirismo. Estudos detalhados sobre estes vários métodos de previsão têm sido apresentados por Fontoura e Barbosa (1982) e Barbosa (1983).

O presente trabalho analisa os recalques superficiais provocados pela escavação de um túnel de pequeno diâmetro escavado em solo residual e executado de acordo com a técnica designada de Mini-Shield. Vários métodos de previsão destes recalques são usados e os valores previstos são comparados aos resultados medidos durante a construção.

2 – DESCRIÇÃO DO CASO-HISTÓRICO

O caso-histórico analisado consiste de um trecho do Túnel Coletor Tronco da Bacia 69 da rede de saneamento da cidade de São Paulo administrado pela empresa de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, SABESP, e construído em 1979 pela empresa de engenharia ETESCO S/A Comércio e Construções. O trecho em questão foi escavado sob a avenida 9 de Julho e instrumentado sob a supervisão do Sector de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da PUCRJ. Figura 1 apresenta o alinhamento do túnel em planta com a localização dos poços de visita e as secções instrumentadas Iguatemi e Giselle.

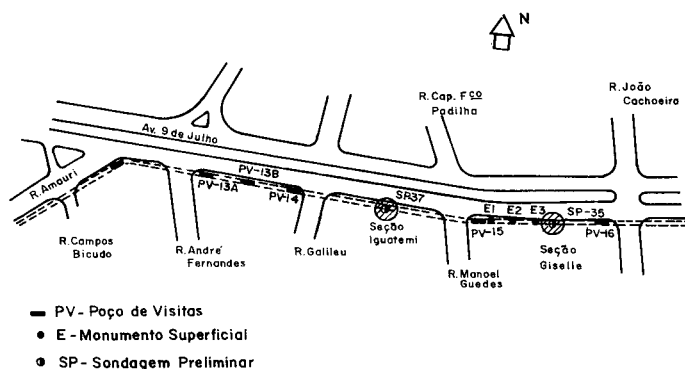
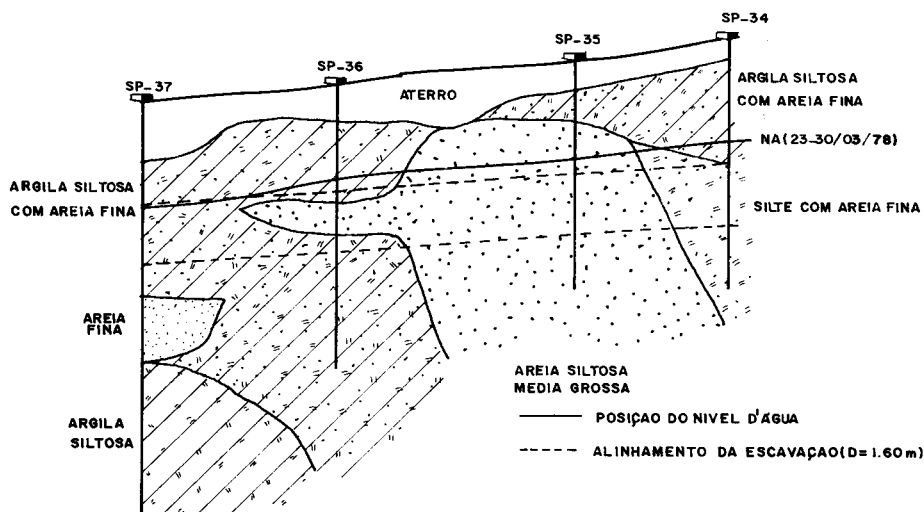


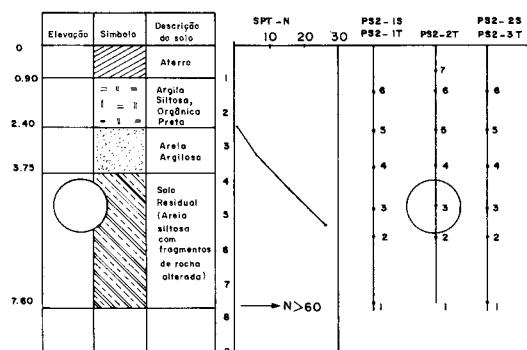
Fig. 1 — Planta de alinhamento do Túnel Esc. 1 : 1000 (PUCRJ, 1979)

Figura 2 apresenta o perfil aproximado do subsolo da região que consiste de um solo residual de gnaiss, arenoso, subjacente a camadas de origem sedimentar e a um aterro argiloso. O programa completo de investigação do subsolo incluindo ensaios de campo (SPT), retirada de amostras e ensaio de laboratório é descrito em detalhes em PUCRJ (1979, 1980 a, 1980 b, 1980 c).

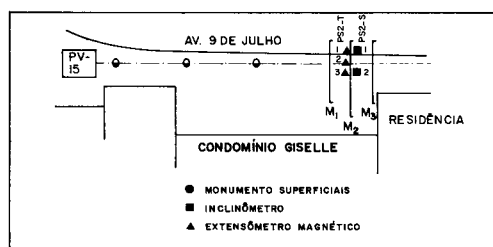
Figura 3a apresenta o perfil geotécnico nas proximidades da secção instrumentada Giselle incluindo os valores médios de algumas propriedades de cada camada. Como pode ser observado nesta figura, o eixo da escavação situa-se a apenas 4.5 m, abaixo da superfície do terreno apresentando o túnel diâmetros externo de 1.6 m e interno de 1.20 m. Figura 3b mostra a localização do trecho instrumentado onde as secções M1, M2 e M3 correspondem a linhas de 12 monumentos superficiais cada a partir das quais foram obtidas as curvas de distribuição de recalques na superfície. O programa de instrumentação assim como os resultados de todas as medições realizadas durante a escavação do túnel são apresentadas em PUCRJ (1979) e PUCRJ (1980 a). A interpretação e análise destes resultados são apresentados em PUCRJ (1980 c), Barbosa (1983) e Fontoura e Barbosa (1983).

O túnel em consideração foi executado seguindo a metodologia do sistema integrado Mini-Túnel cuja descrição é apresentada por Rees (1971) e Panambra (1980). Este método construtivo consiste na utilização de uma couraça de cerca de 3 m de comprimento que permite a integração dos processos de escavação (neste caso executada manualmente) e de revestimento do túnel com segurança, realizando-se o





(a)



(b)

Fig. 3 — Perfil do subsolo e localização da instrumentação

avanco da obra em segmentos de 60 cm de comprimento. Cada anel de revestimento é composto por 3 segmentos iguais de concreto não-armado de 60 cm de comprimento efetivo, sendo as juntas longitudinais e transversais vedadas com uma tira de borracha não curada. Os anéis assim formados apresentam 3 furos para a injeção de preenchimento do vazio deixado entre o revestimento e o solo após o avanço da couraça, que é feito com pedriscos e argamassa. Figura 4 representa um trecho típico de um mini-túnel onde se pode observar mais claramente a sequência de construção.

Esta sequência pode ser resumida nos seguintes passos:

- montagem do anel de revestimento na parte traseira da couraça;
- escavação da frente de avanço;
- avanço da couraça;
- injeção de pedriscos entre o revestimento e o solo;
- montagem de um novo anel de revestimento e repetição dos passos anteriores.

No presente túnel a injeção de nata de cimento foi feita após o término da obra tendo sido realizada em um único dia em todo o trecho instrumentado (Bernardes, 1982).

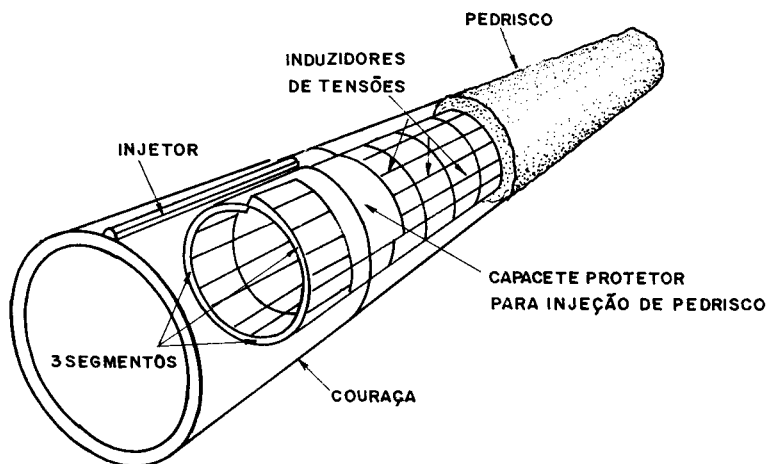


Fig. 4 — Sistemas de Montagem do Mini-Túnel (Panambra, 1980)

3 — MÉTODOS DE PREVISÃO

No presente trabalho foram utilizados 7 diferentes métodos, divididos em empíricos e semi-empíricos, para a previsão dos recalques superficiais. Os métodos classificados como empíricos consideram que a distribuição transversal dos recalques na superfície causados pela escavação de um túnel circular isolado, pode ser representado por uma curva de Gauss, descrita pela equação(1). A diferenciação básica entre os diversos métodos consiste na forma de estimar os parâmetros que definem tal curva. Estes parâmetros, recalque máximo (ρ_{max}) e a distância do ponto de inflexão da curva ao eixo (i), são determinados, de um modo geral, através de correlações estatísticas baseadas em casos históricos e fazendo uso apenas de uma descrição qualitativa do tipo de solo.

$$\rho(x) = \rho_{max} \cdot \exp \left\{ -x^2/2 i^2 \right\} \quad (1)$$

A seguir uma breve revisão sobre a metodologia de uso dos diversos métodos empíricos utilizados neste trabalho é apresentada. Uma revisão completa sobre métodos, suas hipóteses simplificadoras e formas de estimar os parâmetros é apresentada por Fontoura e Barbosa (1982) e Barbosa (1983).

Os parâmetros de definição da curva de Gauss são determinados pelas equações (2) e (3) onde z , D , R , V_t correspondem respectivamente a profundidade do eixo do túnel, diâmetro do túnel, raio do túnel e volume de solo deslocado na periferia do túnel por unidade de comprimento. K_a e n são parâmetros empíricos adimensionais.

$$\rho_{max} = \left(\frac{0.8 V_t}{K_a \cdot D} \right) \left(\frac{z}{D} \right)^{-n} \quad (2)$$

$$i = R \cdot K_a \cdot \left(\frac{z}{D} \right)^n \quad (3)$$

Nesta formulação z e D são elementos de projetos, o parâmetro V_t tem que ser estimado empiricamente por comparação a casos históricos similares, observando-se que este método se baseia na hipótese de que o volume de solo deslocado na superfície, V_s , é idêntico ao volume de solo deslocado na periferia da escavação. Para a estimativa dos parâmetros adimensionais K_a e n podem ser seguidas as sugestões abaixo

- a) $n = 0,0$, $K_a = 1,0 - 1,5$: Peck (1969), Peck et al. (1969)
- b) $n = 0,5-1,0$, $K_a = 0,5 - 1,5$: Attewell (1977)
- c) relação entre K_a e n dependendo do tipo de solo de acordo com a figura 5: Fontoura e Barbosa (1982), Barbosa (1983).

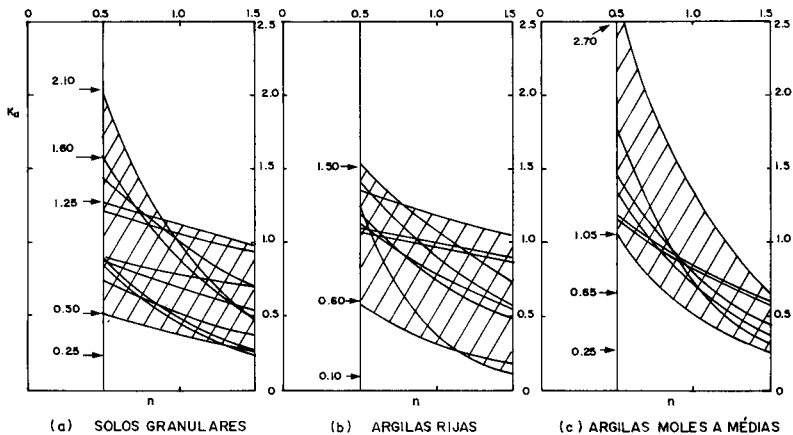


Fig. 5 — Relação entre K_a e n para vários tipos de solo (Barbosa, 1983)

— *Modelo de Sweet e Bogdanoff (1965)*

Por este método, o recalque máximo é determinado indiretamente, a partir da expressão(4), que representa a definição teórica da área sob a curva de Gauss, devendo-se portanto estimar os parâmetros V_s e i previamente. Para o volume de solo deslocado na superfície por unidade de comprimento do túnel (V_s), Sweet e Bogdanoff sugerem a estimativa empírica, (estimar V_t e considerar $V_t = V_s$) e para o parâmetro i , sugerem a expressão(5) no caso de solos não coesivos, onde z é a profundidade do eixo do túnel e K um parâmetro empírico de dimensão $[L]^{1/2}$.

Attewell (1977) complementou a formulação de Sweet e Bogdanoff (1965), propondo a expressão(6) para o caso de solos coesivos.

$$V_s = \sqrt{2 \pi} \cdot i \cdot \rho_{m\acute{a}x} \quad (4)$$

$$i = K \cdot \sqrt{z} \quad (5)$$

$$i = \frac{z}{2} \quad (6)$$

Barbosa (1983) sugere um valor médio $k = 1,23 \text{ m}^{1/2}$ a partir do estudo de alguns túneis escavados em subsolos predominantes granulares, mas observou uma grande dispersão dos valores assumidos por este parâmetro nos diversos casos históricos considerados [$K = (0,59 - 2,24) \text{ m}^{1/2}$].

— *Método de Peck (1969)*

Peck sugere a estimativa empírica do recalque máximo, $\rho_{m\acute{a}x}$, que pode ser feita pela expressão [4] apresentada anteriormente, e propõe o ábaco da figura 6 para a determinação do parâmetro i . Para utilizar este ábaco, é preciso classificar o subsolo de um dos três grupos listados abaixo, obtendo-se o parâmetro em função da geometria do túnel e do tipo de material.

- I — rochas, argilas duras, areias acima do nível d'água.
- II — argilas moles a médias.
- III — areias abaixo do nível d'água.

— *Método de Cording e Hansmire (1975)*

Cording e Hansmire introduziram dois novos parâmetros, w e β , representados geometricamente na figura 7, obtidos pela aproximação da curva de Gauss por triângulo isósceles de mesma área, V_s .

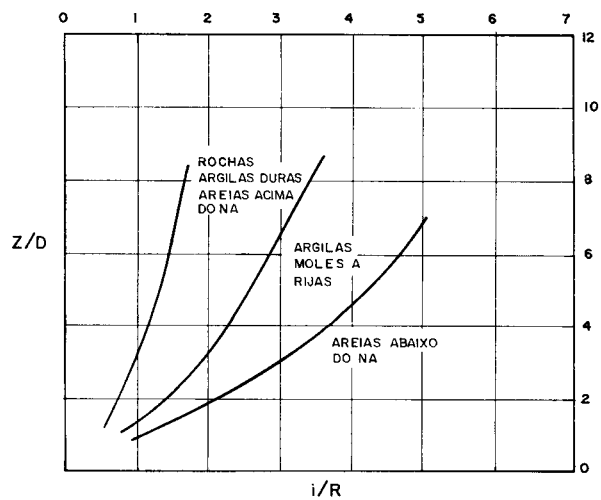


Fig. 6 — Relação entre i e z para vários tipos de solos (Peck, 1969)

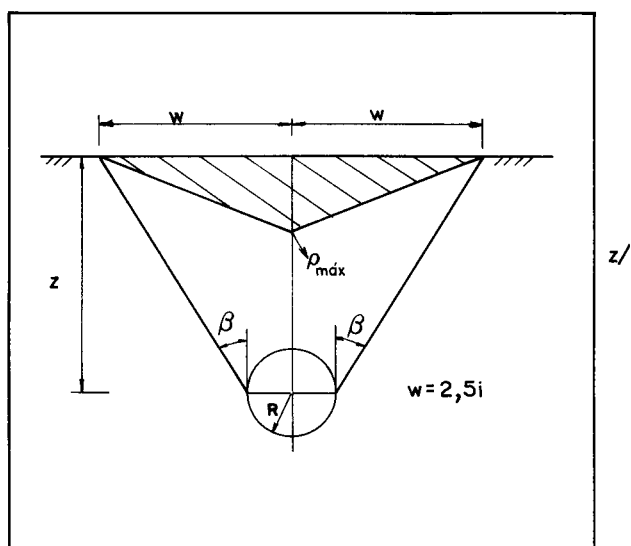


Fig. 7 — Modelo de Cording e Hansmire (1975)

O procedimento a ser seguido é idêntico àquele proposto por Peck (1969), sendo que a estimativa do parâmetro i é feita pelo ábaco de Peck tendo superpostos às curvas-limite originais certas rectas correspondentes a valores particulares de β , tal como está representado na figura 8. A determinação de i consiste portanto na utilização do valor de β fornecido pelo novo ábaco nas expressões(7) e (8) a seguir.

$$w = R + z \cdot \tan \beta \quad (7)$$

$$w = 2,5 \cdot i \quad (8)$$

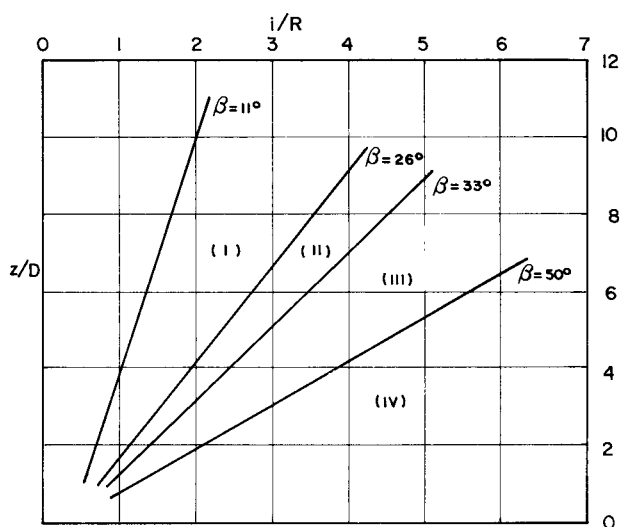


Fig. 8 — Ábaco de Peck modificado por Cording e Hansmire (1975)

— Método de Attewell (1977)

A figura 9 apresenta as redefinições geométricas dos parâmetros w e β citados acima, e cuja representação analítica é indicada as expressões(10) e (11). Segundo Attewell (1977), o parâmetro β , ao invés de ser estimado empiricamente por meio do ábaco de Peck (1969), pode ser calculado em função do ângulo de atrito interno do material em termos de tensões efetivas, pela expressão(9) abaixo.

$$\beta = 45^\circ - \frac{\phi'}{2} \quad (9)$$

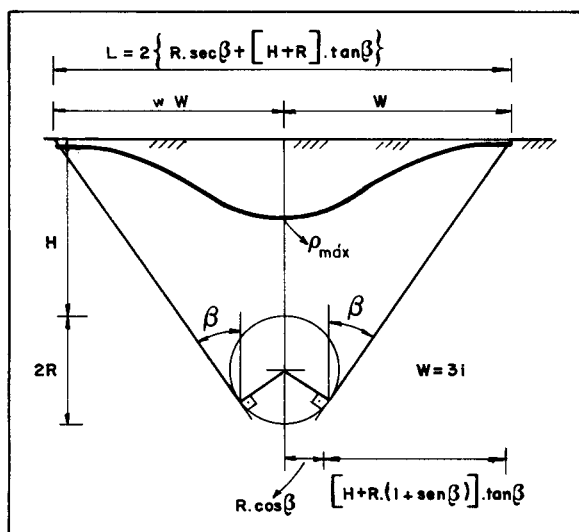


Fig. 9 — Método de Atterwell (1977)

$$w = R \cdot \sec \beta + z \cdot \tan \beta \quad (10)$$

$$w = 3,0 \cdot i \quad (11)$$

O recalque máximo, $\rho_{m\acute{a}x}$, deve ser determinado pela expressão (4), sendo sugerido a estimativa do parâmetro V_s a partir das relações empíricas descritas abaixo, em função do tipo de solo, da qualidade esperada das condições de construção e do volume de escavação por unidade de comprimento (V_E).

a) solos coesivos:

$$OFS = \frac{\gamma \cdot z - P_i}{c_u} \quad (12)$$

onde: OFS = razão de sobrecarga («overload factor»)

γ = peso específico do solo

c_u = resistência não-drenada do solo

P_i = pressão interna do túnel

$$OFS < 4 \quad V_s \cong 1\% V_E$$

Se $4 < OFS < 6 \quad V_s = 1 - 5\% V_E$

$$OFS > 6 \quad \text{a escavação provavelmente é instável}$$

b) solos granulares:

i) dilatantes (areias densas):

$$\text{condições precárias de construção} \quad V_s = 2,5 - 5\% V_E$$

$$\text{boas condições de construção} \quad V_s = 1 - 2\% V_E$$

ii) compressíveis (areias fofas):

$$V_s < 5\% V_E, \text{ sendo este limite bastante conservador.}$$

Os métodos ditos semi-empíricos oferecem uma alternativa de uso em relação aos já mencionados métodos empíricos e também aos métodos mais completos que incluiriam todos os fatores que condicionam o problema. Basicamente estes métodos consistem em apresentar soluções sob a forma adimensional para a definição da curva de recalques superficiais que já não é necessariamente associada à curva de Gauss. O modo de transformar o problema num caso adimensional, o modelo tensão \times deformação adotado para o solo e a forma da curva de recalques superficiais variam de acordo com o método. Em seguida os dois métodos semi-empíricos usados no presente trabalho são descritos brevemente sendo que uma revisão completa é apresentada por Fontoura e Barbosa (1982) e Barbosa (1983).

— *Método de Oteo e Moya (1979)*

Este método também adota a curva de Gauss para descrever o modo de distribuição dos recalques na superfície, propondo as expressões (13) e (14) para determinar os parâmetros de definição desta curva, $\rho_{m\acute{a}x}$ e i .

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{\gamma \cdot D^2}{E} \cdot (0,85 - \nu) \cdot \psi \quad (13)$$

$$\frac{i}{R} = \left(1,05 \cdot \frac{z}{D} - 0,42 \right) \cdot \eta \quad (14)$$

onde: E = módulo de elasticidade do solo
 ν = coeficiente de Poisson do solo
 ψ, η = fatores adimensionais de correção

Esta solução foi originalmente obtida para o caso idealizado de um túnel circular de eixo horizontal, sem revestimento, escavado em um meio homogêneo e isotrópico de comportamento tensão \times deformação linear-elástico, solicitado apenas pelo peso de material sobrejacente. Foram introduzidos posteriormente os factores adimensionais ψ e η , para representar as divergências entre este modelo e a situação real, os quais devem ser estimados empiricamente. Para a região de Madrid, Oteo e Moya (1979) obtiveram $\eta = 0,70 - 1,30$, não apresentando nenhuma faixa de valores para ψ . Barbosa (1963) encontrou uma maior dispersão nos valores do fator η ($\eta = 0,60 - 3,60$) para diversos casos históricos, mas a insuficiência de dados do subsolo que permitissem a determinação dos parâmetros elásticos E e ν , impediu que fosse avaliado o segundo fator de correção ψ .

— *Método de Résendiz e Romo (1981)*

O modelo adotado por Résendiz e Romo (1981) aplica-se ao caso de um túnel de secção circular e eixo horizontal, escavado com uma couraça, com ou sem proteção adicional da frente de avanço, em um meio homogêneo sob um certo estado de tensão inicial, conhecido e cuja lei de comportamento tensão \times deformação segue o modelo hiperbólico de Duncan e Chang (1970). A solução é apresentada em duas parcelas, de acordo com a fonte de deslocamentos considerada. Assim, as expressões (15) e (16) fornecem, respectivamente, o recalque máximo e a forma de distribuição transversal dos recalques na superfície, associados ao alívio de tensões na face do túnel, e as expressões (17) e (18) fornecem as componentes relacionadas aos movimentos radiais na periferia da escavação, causados pelo preenchimento do vazio eventualmente deixado entre o solo e o revestimento e pelo aumento de compressibilidade do material ao redor do túnel.

$$\frac{\rho m}{H + D} = 0,00508 \cdot (\sigma_h^0 - P_i) \cdot \frac{\epsilon_f}{\sigma_f} \cdot F_I \quad (15)$$

$$\rho(x) = \rho m \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x'}{0,30 + 0,18 \cdot x'} \right)^2 \right] \quad (16)$$

$$\frac{\rho o'}{\delta} = 1 + \left(\frac{H}{D} \right) \cdot \epsilon_f^{-2,4} \quad (17)$$

$$\rho'_{(x)} = \rho o' \cdot \exp \left[-\frac{I}{2} \cdot \left(\frac{x'}{0,23 + 0,43 \cdot x'} \right)^2 \right] \quad (18)$$

$$\text{onde: } x' = \frac{x}{H + D} \quad (19)$$

H cobertura de solo acima da escavação (figuras 10 e 11)

ρ_h^0 tensão horizontal inicial ao nível do eixo do túnel (figura 10)

P_i pressão interna no túnel (figura 10)

ϵ_f valor médio, da superfície ao nível do eixo do túnel, da deformação axial na ruptura, pelo modelo de Duncan e Chang (1970)

ρ_f valor médio, da superfície ao nível do eixo do túnel, da tensão desviadora na ruptura, pelo modelo de Duncan e Chang (1970)

F_I fator adimensional, que assume um valor limite de 2,35 para secções muito distantes da secção onde se iniciou a escavação do túnel

ρ^m parcela do recalque máximo sobre o eixo devida ao alívio de tensões na face do túnel (figura 10)

$\rho o'$ parcela do recalque máximo sobre o eixo, devida aos deslocamentos radiais na periferia do túnel (figura 11)

δ deslocamento radial total na periferia do túnel (figura 11)

Como se depreende das expressões(16) e (18) acima, este método não associa a distribuição transversal dos recalques na superfície a uma gaussiana, embora representando-a por uma exponencial.

Pode-se observar ainda que, à excepção do parâmetro δ da expressão(17), todas as grandezas envolvidas na previsão são determinadas a partir da geometria do túnel e das características geotécnicas do subsolo. O parâmetro δ citado tem que ser estimado empiricamente em cada caso, e a forma final da curva de recalques prevista é resultante da combinação das expressões(16) e (18).

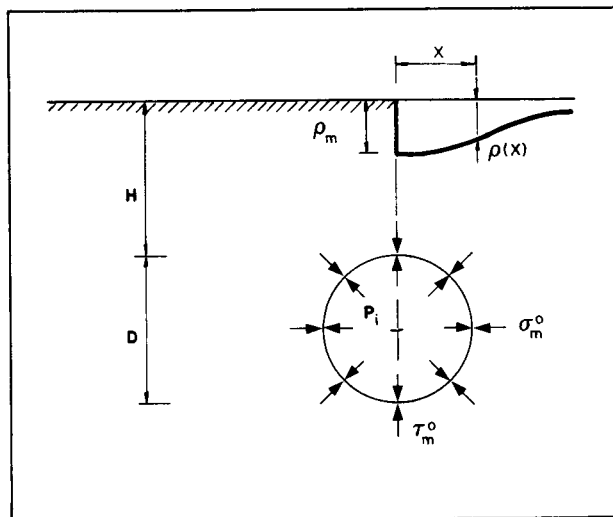


Fig. 10 — Recalque devido ao alívio de tensões (Résendiz e Romo, 1981)

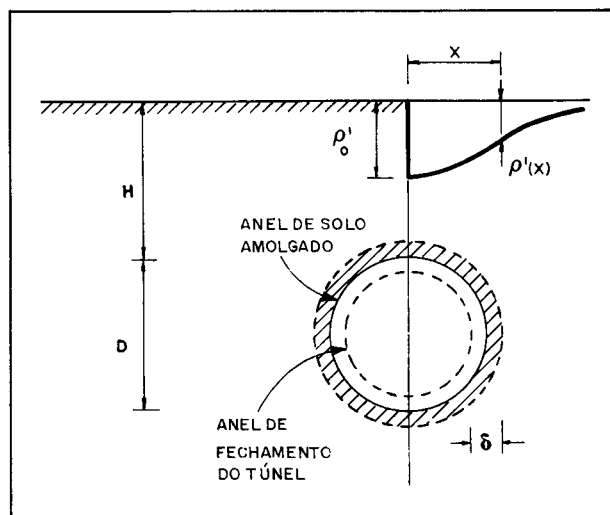


Fig. 11 — Recalque devido a deslocamentos radiais ao redor do túnel (Résendiz e Romo, 1981)

4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

A redução do perfil representado na figura 3a a um meio homogêneo, consistiu na hipótese de um subsolo composto unicamente pelo solo residual arenoso, já que ao longo de toda a secção instrumentada apenas este material era atravessado diretamente pela escavação. Na tabela 1 são apresentados todos os parâmetros de compressibilidade e resistência determinados para o solo residual, a partir de dois ensaios triaxiais de compressão vertical, isotropicamente adensados e drenados, com saturação dos corpos de prova por uma contrapressão de 60 t/m². Apenas para o cálculo da pressão de sobrecarga ao nível do eixo do túnel, σ_v , foram considerados os pesos específicos naturais de todos os estratos e as suas respectivas espessuras.

A estimativa do volume de solo deslocado na superfície por unidade de comprimento (V_s), foi feita com base nas relações empíricas propostas por Attewell (1977), para solos granulares e boas condições de construção. Obteve-se assim um valor médio de 0,03 m³/m para este parâmetro, correspondente a 1,5% do volume escavado por unidade de comprimento do túnel, V_E . Neste caso particular foi medido, através de extensômetros múltiplos, um recalque final de 12,30 mm a 25 cm acima do teto da escavação, o que fornece o mesmo valor para o volume de solo deslocado na periferia do túnel por unidade de comprimento, V_t , pela expressão de Cording e Hansmire (1975) transcrita abaixo;

$$V_t = \rho_{tmax} \cdot 2 (R + d) \quad (20)$$

onde: $0 < d < 2m$ distância do ponto de medição ao teto do túnel. ρ_{tmax} recalque medido sobre o teto do túnel

Os parâmetros empíricos do modelo de Litwiniszyn (1956) foram determinados pela figura 5 (a), para três valores característicos do parâmetro n : $n = 0,8$ (sugestão de Peck, 1969), $n = 0,5$ e $n = 1$ limites sugeridos por Attewell, 1977). Os valores de K_a correspondentes são, respectivamente, 0,88, 1,30 e 0,75, segundo Barbosa (1983). Para determinar o parâmetro empírico K do modelo de Sweet e Bogdanoff (1965), foi necessário selecionar quatro casos históricos envolvendo escavação com couraça em solo granular, com factor de profundidade em torno de 2, cuja retroanálise por este modelo forneceu um valor médio de 1,3 m^{1/2}. Para a aplicação dos métodos de Peck (1969) e de Cording e Hansmire (1975), o subsolo em questão foi considerado como «areia acima do nível d'água», grupo (I) dentro da classificação de Peck (1969).

Nos métodos restantes, foram aplicados diretamente os parâmetros geotécnicos apresentados na tabela 1, sendo interessante entretanto tecer alguns comentários sobre a utilização destes parâmetros no método de Résendiz e Romo (1981). Apesar do método indicar para ϵ_r e δ_r da expressão (15) os valores médios destes parâmetros da

Tabela 1 – Propriedades do Solo Residual

σ_3' (kg/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kg/cm ²)	PARÂMETROS ELÁSTICOS			PARÂMETROS DO MODELO HIPERBÓLICO			PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA		
		E _i (kg/cm ²)	V	a	b	E _i (kg/cm ²)	k	n	c' (kg/cm ²)	ϕ'
0,30	1,36	55,8	—	1,7	0,1	58,8	504	1,76	0,33	24º
0,60	1,74	88,8	0,375	0,5	0,5	200				

superfície ao nível do eixo do túnel, pela falta de dados e pela simplificação feita para o subsolo neste caso particular, optou-se por assumir os valores correspondentes ao ensaio cuja pressão confinante era mais próxima da situação de campo ao nível do eixo do túnel, $\sigma'_3 = 6,0 \text{ t/m}^2$.

Para a determinação da tensão horizontal total ao nível do eixo do túnel antes da escavação, σ_h^0 , conhecida a tensão vertical total, $\sigma_v^0 = 7,23 \text{ t/m}^2$, foram feitas hipóteses sobre os valores prováveis da razão entre as duas tensões, K (vide expressão (21) abaixo). O subsolo em questão apresentava-se não saturado ($S = 80\%$), obtendo-se, pelos dados da tabela 1, um coeficiente de empuxo no repouso, K_0 , da ordem de 0,60 pela expressão (22). Considerando-se que a pressão neutra na água deve ser negativa, e que portanto o parâmetro K deve ser inferior a K_0 , calculou-se a tensão horizontal total (σ_h^0) para $K = 0,10 - 0,60$.

Para o parâmetro δ da expressão (17), foi considerado o valor do recalque final medido sobre o teto do túnel, $\rho_{\text{máx}}$, igual a 12,30 mm.

$$K = \frac{\sigma_h^0}{\sigma_v^0} \quad (21)$$

$$K_0 = \frac{\sigma_h^0}{\sigma_v^0} = 1 - \tan \phi' \quad (22)$$

Os resultados da previsão foram resumidos na tabela 2, acrescentando-se na última linha desta tabela os valores obtidos pelo ajuste das curvas de distribuição transversal dos recalques superficiais medidos por curvas de Gauss, nas três secções instrumentadas (M1, M2 e M3). Barbosa (1983) e Fontoura e Barbosa (1983) mostram que o ajuste das curvas reais por gaussianas apresentou-se bastante satisfatório neste caso particular, fornecendo uma curva média representativa das três secções, que seria descrita pela expressão (23), com $\rho_{\text{máx}} = 10,7 \text{ mm}$ e $i = 1,65 \text{ m}$.

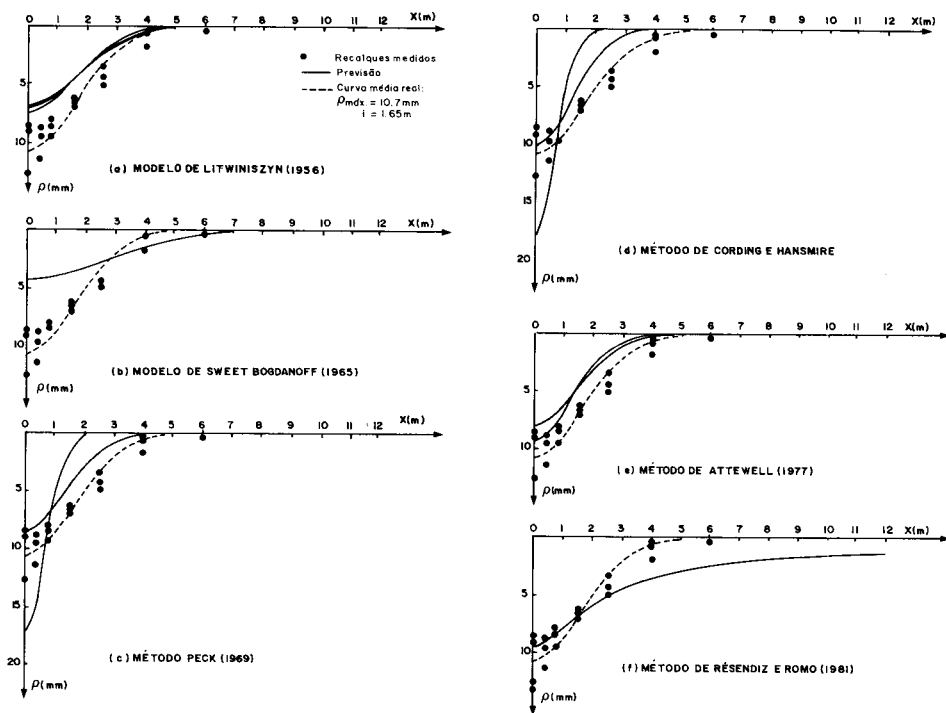


Fig. 12 — Curvas de distribuição de recalques (Barbosa, 1983)

Na prática é importante que se obtenha não apenas a ordem de grandeza dos recalques máximos, mas também a declividade destas curvas de distribuição, para a obtenção dos recalques diferenciais que podem ser produzidos pela escavação do túnel próximo à superfície. Para analisar a previsão sob este aspecto, foram traçadas as curvas das figuras 12 (a) a (g), onde se superpõe às curvas previstas, a curva média real e os recalques medidos em todas as seções instrumentadas.

$$\rho(x) = 10,7 \cdot \exp \left[-\frac{2}{5,45} \right] \quad (23)$$

Os resultados apresentados na tabela 2 para os métodos de Litwiniśzyn (1956) e Cording e Hansmire (1956), representam as curvas médias previstas por estes métodos, os quais fornecem originalmente um intervalo de variação bastante amplo para os dois parâmetros de definição da curva de Gauss, ρ_{max} e i . Os resultados completos da

previsão podem ser encontrados em Barbosa (1983), e a existência destes intervalos decorre da imprecisão da estimativa dos parâmetros adimensionais K_a e n no caso do método Litwiniszyn (1956), e do parâmetro i , nos dois outros métodos.

Embora subestimem o recalque máximo sobre o eixo do túnel, os métodos de Litwiniszyn (1956) e de Attewell (1977) prevêm curvas de distribuição dos recalques na superfície bastante representativas do comportamento observado no campo. É interessante notar que a variação dos recalques previstos pelo método de Litwiniszyn (1956) é muito pequena para o intervalo $n = 0,5-1,0$ utilizado, facto que está representado na figura 12 (a) pela superposição das curvas de recalque previstas. O método de Attewell (1977) fornece uma curva de distribuição de recalques praticamente paralela à curva média de Gauss ajustada às medições, mas como este ajuste subestimou os recalques nas extremidades laterais (Barbosa, 1983), a curva prevista na verdade apresenta maiores recalques diferenciais do que realmente ocorreram, como pode ser observado na figura 12 (e) pelos pontos correspondentes aos recalques medidos nas três secções instrumentadas.

O método de Swett e Bogdanoff (1965) superestimou consideravelmente o parâmetro i (vide tabela 2), e em consequência subestimou o recalque máximo sobre o eixo do túnel. A curva de distribuição dos recalques na superfície prevista por Swett e Bogdanoff está representada na figura 12 (b), divergindo totalmente do comportamento observado no campo para o caso histórico analisado. Na realidade o problema central da aplicação deste método residiu na grande variabilidade obtida pelos dados disponíveis para o parâmetro empírico K , utilizado na estimativa da distância do ponto de inflexão ao eixo, i . Foi adoptado para a previsão o valor médio $1,30 \text{ m}^{1/2}$, quando uma retro-análise deste caso particular indicaria K da ordem de $0,75 \text{ m}^{1/2}$. Como não há nenhum modo alternativo de determinação deste parâmetro, esta imprecisão é inerente ao método.

Os métodos de Peck (1969) e de Cording e Hansmire (1975) podem ser discutidos em conjunto, já que apresentam metodologia e resultados muito semelhantes, podendo-se verificar que a modificação introduzida por Cording e Hansmire não produziu uma mudança significativa dos resultados da previsão. Ambos superestimam o recalque máximo e subestimam o parâmetro i , embora próximo aos limites das medições de campo, apresentando consequentemente curvas de declividade mais acentuada do que as curvas reais, como pode ser constatado nas figuras 12 (c) e (d).

Pela tabela 2 e pela figura 12 (f), verifica-se que a previsão pelo método semi-empírico de Oteo e Moya (1979), sem levar em conta os fatores de correcção ψ e η , se apresenta completamente distinta do comportamento real. No entanto, Oteo e Moya assumem um material de comportamento tensão deformação linear-elástico, representado pelos parâmetros elásticos determinados para o subsolo em questão. No caso histórico presentemente estudado, a determinação destes parâmetros foi feita de forma muito precária, o que pode ter contribuído para a discrepância entre o resultado da previsão e o comportamento real.

O método de Résendiz e Romo (1981) forneceu uma boa previsão da ordem de grandeza do recalque máximo, mas a curva de distribuição dos recalques prevista não corresponde ao comportamento de campo, neste caso particular [vide figura 12 (g)], prevendo recalques diferenciais bastante inferiores aos que realmente ocorreram. É interessante assinalar que este método de previsão foi desenvolvido com base no comportamento da argila mole da Cidade do México.

Tabela 2 — Quadro Geral das Previsões e das Medições de Campo

Método de Previsão	$\rho_{\text{máx}}$ (mm)	i (m)	V_s (m ³ /m)	ρ_x (mm)
Litwiniszyn (*) (1956)	(1) 6,85	1,75		$6,85 \cdot \exp(-x^2/6,13)$
	(2) 7,40	1,62	0,03	$7,40 \cdot \exp(-x^2/5,23)$
	(3) 7,05	1,70		$7,05 \cdot \exp(-x^2/5,80)$
Sweet e Bogdanoff (1965)	4,32	2,77	0,03	$4,32 \exp(-x^2/15,35)$
Peck (1956) (*)	11,40	1,05	0,03	$11,40 \exp(-x^2/2,21)$
Cording e Hansmire (1975)	12,87	0,93	0,03	$12,87 \cdot \exp(-x^2/1,73)$
Attewell (1977)	9,21	1,30	0,03	$9,21 \exp(-x^2/3,38)$
Oteo e Moya (**) (1979)	2,5 ψ	5,54 η	0,03	$2,5 \exp(-x^2/61,38)$ ($\psi = 1$, $\eta = 1$)
Reséndiz e Romo (1981)	9,0	—	—	$0,85 \exp[-0,5(\times/1,6 + 0,18 \times)^2] + 8,15 \exp[-0,5(\times 1,23 + 0,43 \times)^2]$
Valores medidos no	(4) 9,20	2,20	0,05	$9,20 \exp(-x^2/9,68)$
	(5) 10,30	1,60	0,04	$10,30 \exp(-x^2/5,12)$
	(6) 12,60	1,15	0,04	$12,60 \exp(-x^2/2,65)$

(*) curvas obtidas com os parâmetros médios

(**) por retroanálise seriam obtidos $\psi = 4,3$ e $\eta = 0,4$

(1) $\eta = 0,5$ $K_a = 1,30$

(2) $\eta = 0,8$ $K_a = 0,88$

(3) $\eta = 1,0$ $K_a = 0,75$

(4) Secção M1

(5) " M2

(6) " M3

5 – COMENTÁRIOS FINAIS

Os métodos de previsão apresentados têm como característica comum a formulação matemática simples, resultante de um número substancial de simplificação do problema real, a qual gera a necessidade de introdução de parâmetros empíricos da escavação de túneis em solo. Os parâmetros empíricos não levam em conta as propriedades geotécnicas reais do subsolo, e representam de forma indirecta e aproximada os factores de influência dos deslocamentos. Este empirismo limita consideravelmente a confiabilidade da previsão, já que a sua qualidade é função directa da representatividade dos parâmetros empíricos estimados, para cada caso particular.

No entanto, pelos resultados obtidos neste trabalho e resumidos na tabela 2, observa-se uma boa concordância da previsão com o comportamento de campo, para a maioria dos métodos utilizados. A qualidade deste resultado é indicativa de que estes modelos simplificados podem representar razoavelmente o comportamento médio de túneis reais, embora deva-se ressaltar a ausência de problemas construtivos neste caso histórico, e que o método construtivo empregado não foi levado em consideração, a não ser indirectamente na estimativa dos parâmetros empíricos.

Os resultados obtidos para este caso histórico, aliados à confiabilidade restrita desta classe de métodos de previsão, recomendam a sua aplicação apenas em uma fase preliminar de projeto, e o seu aprimoramento progressivo, ou o desenvolvimento de métodos mais acurados.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer à SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo) pela liberação dos dados utilizados neste trabalho, e ao CNPq (Conselho Nacional de Ensino e Pesquisa) pela bolsa de estudos fornecidas à Eng. Maria Cláudia Barbosa durante a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATTEWELL, P. B. (1977) – «*Ground Movements Caused by Tunnelling in Soil*». Proceedings of the Conference of Large Ground Movements and Structures, Cardiff, U. K., p. 167.
- BARBOSA, M. C. (1983) – «*Recalques Superficiais Gerados pela Escavação de Túneis em Solos*». Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUCRJ, April, 163 p.
- BERNARDES, G. (1982) – «*Comunicação Pessoal*».
- CORDING, E. J. e HANSMIRE, W. H. (1975) – «*Displacements Around Soft Ground Tunnels*». Proceedings of the Vth. Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng., Buenos Aires, vol. IV, pp. 569-633.

- DUNCAN, J. M. e CHANG, C. Y. (1970) – «*Non-Linear Analysis of Stress and Strain in Soils*». Proc. of ASCE, Jnl. of the Soil Mech. and Found. Div., SM5, vol. 96, Setp.
- FONTOURA, S. A. B. e BARBOSA, M. C. (1982) – «*Recalques Superficiais Causados pela Escavação de Túneis em Solos*», Anais do Simpósio sobre Escavações Subterrâneas, Rio de Janeiro, Nov. vol. I, pp. 587-623.
- FONTOURA, S. A. B. e BARBOSA, M. C. (1983) – «*Displacements Associated with a Soft Ground Mini-Tunnel Excavated in Downtown São Paulo, Brazil*». Proc. of the VIIIth. PanAmerican Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vancouver, June, vol. I, pp. 243-258.
- LITWINISZYN, J. (1956) – «*Application of the Equation of Stochastic Processes to Mechanics of Loose Bodies*» Arch. Mech. Stosow, vol. B, pp. 393-411.
- OTEO, C. S. e MOYA, J. F. (1979) – «*Settlements Induced by a Tunnel in Miocenic Soft Rocks of Madrid*». Proc. of the IVth Rock Mech. Cong. of the I.S.R.M., Montreaux vol. I, pp. 715-722.
- PANAMBRA (1980) – «*Mini-Túneis Sistema Seerflex*». Panambra Indústria e Técnica S. A.
- PECK, R. B. (1969) – «*Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground*». State-of-the-Art Volume, Proc. of the 7th. Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Mexico, pp. 225-290.
- PECK, R. B.; DEERE, D. V.; MONSEES, J. E.; PARKER, H. W. e SCHMIDT, B. (1969) – «*Some Design Considerations in the Selection of Underground Support System*». Report to Office of High Speed Ground Transp. and Urban Mass Transp. Administration, Washington, D.C., USA, Contract No. 3-0152.
- PUCRJ (1979) – «*Condições Geotécnicas e Instrumentação Instalada*» 1.º Relatório de Progressos submetido a SABESP.
- PUCRJ (1980 a) – «*Observação da Instrumentação*» 2.º Relatório de Progressos submetido a SABESP.
- PUCRJ (1980 b) – «*Ensaio de Laboratório*» 3.º Relatório de Progressos submetido à SABESP.
- PUCRJ (1980 c) – «*Interpretação Preliminar dos Resultados*» 4.º Relatório de Progressos submetido à SABESP.
- REES, W. F. (1971) – «*Mini Tunnels International Limited/Design Operations Specifications*», Internal Report, William F. Rees Ltd, United Kingdom.
- RÉSENDIZ, D. e ROMO, M. P. (1981) – «*Settlements Upon Soft-Ground Tunnelling: Theoretical Solution*», em: Soft-Ground Tunnelling-Failure and Displacements, Résendiz e Romo (Eds), A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 65-74.