



INTRODUÇÃO

A Baixada Santista sempre foi um desafio para a engenharia nacional, tanto no que se refere à sua travessia quanto às construções civis e industriais. A propósito de sua travessia, para Vargas (1973, p. 48), “a ligação de Santos a São Paulo, no tempo das diligências, começava em Cubatão e não em Santos. Havia a necessidade de vir de Santos a Cubatão por barco e dali, então, é que se subia, por diligência, a São Paulo”. A primeira estrada de ferro brasileira fazia a conexão Petrópolis-Mauá e, de Mauá ao Rio de Janeiro, o passageiro tomava a famosa Barca de Petrópolis. Um homem a pé atolava nos manguezais que circundavam essas duas cidades litorâneas.

Há muito tempo, os engenheiros civis preocupam-se em entender as argilas marinhas, de ocorrência generalizada ao longo da planície costeira santista, por vezes subjacentes a camadas de areias finas, uniformes e compactas, de espessuras variáveis, como na cidade de Santos. A consistência de muito mole a mole levou a certo consenso de que as argilas marinhas eram normalmente adensadas (Pacheco Silva, 1953a), com esta e outras características bem definidas.

Com o decorrer do tempo, começaram a surgir alguns “casos inusitados”, conforme Teixeira (1960a), ao relatar o caso do edifício de São Vicente (praia de Itararé), apoiado sobre um “bolsão” de argila altamente pré-

-adensada, com pressões de pré-adensamento de 600 a 700 kPa. Outros casos podem ser relatados quanto à “discordância” entre camadas de argilas muito moles e moles, sobrepostas a camadas de argilas médias a rijas, às vezes duras, na Baixada Santista. Um deles ocorreu em fins da década de 1940, quando engenheiros do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), ao estudarem as fundações da travessia do Canal do Casqueiro pela Via Anchieta, depararam-se com dois horizontes nitidamente distintos de “argilas orgânicas”: o superior, de consistência geralmente mole, e o inferior, de consistência rija. Outro caso (Sousa Pinto e Massad, 1978) foi registrado na região da Ilha de Santana ou Candinha, durante a construção da Via dos Imigrantes, com a ocorrência, abaixo dos 14 m, de camada de argila com SPT da ordem de 5. Em todos os casos, as camadas inferiores apresentavam-se sobreadensadas, com pressões de pré-adensamento sem relação com o peso efetivo de terra.

Na época, esses achados não tiveram explicações plausíveis e levantavam a questão da origem real desses sedimentos, respondida em fins da década de 1970 (Suguió e Martin, 1978a, 1981, 1994), com as variações relativas do nível do mar (N.M.) na origem de sua evolução. Basicamente, dois episódios transgressivos, isto é, de

ingressão do mar rumo ao continente, um no Pleistoceno e outro no Holoceno, deram origem a tipos diferentes de sedimentos: a) as areias e argilas transicionais (ATs); b) os sedimentos fluviolagunares e de baías (SFL); c) os sedimentos de mangues.

Nos anos seguintes, tornou-se impreterível o estudo das características geotécnicas dos solos da Baixada Santista, em função de sua gênese. Foram e são feitos aprofundamentos, com novidades como critérios para a diferenciação dos vários tipos de sedimentos, sua distribuição em subsuperfície e os mecanismos que controlam o seu sobreadensamento.

Os trabalhos de Teixeira e de Suguio e Martin voltaram-se, respectivamente, aos aspectos geotécnicos e geológicos, tornando-se (Massad, 1985a) fios condutores de uma reavaliação profunda e consistente dos conhecimentos geotécnicos dos solos da Baixada Santista. O de Teixeira (1960a) situa-se mais no final da década de 1950 e relata o caso de um edifício apoiado em camada “inusitadamente” sobreadensada, um surpreendente achado na época. Os trabalhos de Suguio e Martin (1978a, 1981, 1994) sobre as flutuações do nível do mar e a evolução costeira do Brasil serão tomados como a culminância de um processo, por ser o resultado do maior programa de pesquisas de que se tem conhecimento sobre as áreas submersas do território brasileiro – Projeto Remac.

Apesar de estarem tão afastados no tempo e no conteúdo, os trabalhos se cruzaram no ponto factual, pois o achado de Teixeira encontrou a explicação científica na descoberta de Suguio e Martin dos possíveis mecanismos que controlaram a sedimentação nas planícies quaternárias do litoral do Estado de São Paulo. Essa aproximação é como se um feixe de luz partisse do primeiro trabalho e

iluminasse o segundo. O geológico explicou o geotécnico e abriu a possibilidade de colaborar em forma de questionamento, de confirmação e mesmo de novas contribuições.

Há muito tempo, as obras civis realizadas na região da Baixada Santista defrontam-se com alguns dos mais difíceis problemas da engenharia de solos. As argilas superficiais na região apresentam geralmente consistência muito mole a mole, com elevada sensibilidade: são as argilas de sedimentos fluviolagunares e de baías (SFL), sobrejacentes, de forma discordante, a sedimentos argilosos mais profundos, médios a rijos – as argilas transicionais (ATs). Diversas sondagens revelavam essa “discordância” no final da década de 1940, no caso das investigações geotécnicas para a construção da ponte sobre o Canal do Casqueiro, na Via Anchieta, e até os nossos dias. Os principais problemas são:

- a) a existência de extensas áreas de manguezais, que acarretam problemas de recalques excessivos e, não raro, de rupturas de aterros;
- b) a necessidade de executar fundações profundas, de elevado custo, para obras de arte, instalações industriais, edifícios etc.;
- c) o custo de materiais de construção tanto para serviços de terraplenagem (aterros de solos argilosos) quanto para o uso em concreto (areias e materiais pedregosos).

Mesmo nas regiões das planícies costeiras, há camadas de argilas marinhas compressíveis, subjacentes a estrato arenoso, nas quais se apoiam diretamente as fundações de edifícios. É o caso da cidade de Santos, onde a maioria dos edifícios sofre recalques de elevada monta e frequentes desaprumos, causando sérios problemas aos seus moradores.

profundas para grandes estruturas, acima de 12 andares. De qualquer forma, mesmo que se esteja longe de situações de instabilização, verifica-se em Santos, há muito tempo, prédios trincados e fora de prumo.

Até recentemente, fundações profundas eram proibitivas pelas dificuldades e impossibilidades técnicas de atravessar as camadas de argilas compressíveis e atingir estrato firme (Teixeira, 1960b, 1994), além dos dispêndios que implicavam cerca de 15% do custo global da construção, em prazo curto (Golombek, 1965).

Daí a importância que se deu à medida dos recalques dos edifícios. Assim, o Edifício S. A., citado por Teixeira (1960b), o primeiro de grande porte (15 pavimentos) a ser construído na orla marítima de Santos, em 1947, foi instrumentado e monitorado pela firma Geotécnica S. A. Na década de 1950, o IPT fazia as medições de recalques de vários edifícios, relatadas por Machado (1961). Mais recentemente, outros edifícios foram e continuam sendo monitorados e analisados por diversos autores, como Reis (2000), Cardozo (2002) e Gonçalves et al. (2002a).

Em geral, os recalques máximos dos edifícios situavam-se entre 40 e 120 cm (Teixeira, 1994); em alguns casos, com uma inesperada dispersão de valores, abaixo e acima dessas cifras. De acordo com Nunes (2003), cerca de cem edifícios são inclinados (recalques diferenciais excessivos); num caso extremo, e muito conhecido, o Edifício Núncio Malzoni, construído em 1967, inclinou-se $2,2^\circ$ e foi reaprumado com o emprego de fundação profunda (Maffei et al., 2001).

As causas mais frequentes dos desaprumos foram atribuídas (Teixeira, 1994):

- a) à construção simultânea de edifícios vizinhos (interferência entre bulbos de pressão);

- b) à construção de edifício com uma distância de 4 a 10 m de outro mais antigo (sobreadensamento de parte do terreno, induzido por prédios vizinhos);
- c) à forma da área carregada (“T” e “L” eram tidas como as mais problemáticas);
- d) a carregamentos não uniformes (blocos de um mesmo edifício com diferentes alturas).

Todavia, ocorreram casos que desafiavam explicações.

A começar pela forma, em planta, vários edifícios comportavam-se como indicado na Fig. 2.2A (Teixeira, 1960b, 1994), divergindo de outros casos em que o comportamento dos edifícios foi o esperado: um maior recalque para o pilar A (Fig. 2.2A), mais carregado; um exemplo recente é o Edifício da Unisanta (Gonçalves e Oliveira, 2002a).

O Edifício S. A. apresentou recalques diferenciais entre os pilares 1 e 40 (Fig. 2.2B), fato que, segundo Teixeira (1960b), não pode ser explicado racionalmente. Da mesma forma, o Edifício Excelsior (Fig. 2.3), construído em 1965, ao lado do Canal 4, permaneceu isolado por vários anos e, mesmo assim, inclinou-se para a frente e para o lado do canal, também sem nenhuma explicação racional.

Os recalques absolutos dos edifícios mostram uma grande dispersão de valores. Reportando-se à Tab. 2.2, para os

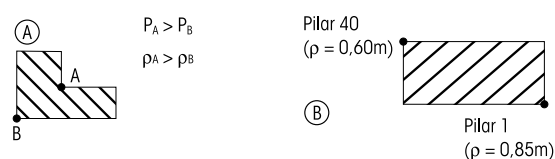


FIG. 2.2 Recalques anômalos: (A) em edifícios com planta em forma de “L”; e (B) Edifício S. A. (P e ρ são a carga e o recalque nos pilares) (Teixeira, 1960b)

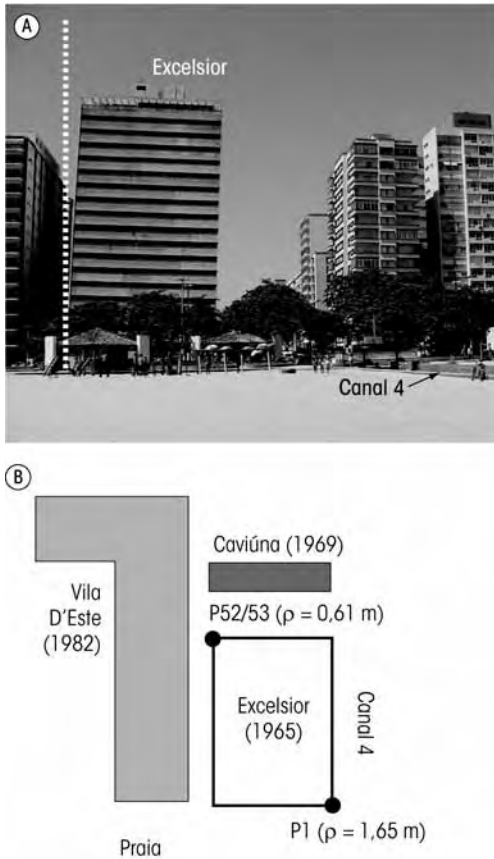


FIG. 2.3 (A) Edifício Excelsior, Santos; (B) planta da área com datas de construção dos edifícios vizinhos (Cardozo, 2002)

edifícios do Macuco, com 12 andares, os recalques atingiram 60 mm após 900 dias, bem inferiores aos cerca de 300 mm dos

Edifícios C e D, o que não se justifica pela diferença entre as espessuras (Δh) das camadas de argila mole. Comparando o Unisanta e o Edifício U, com o mesmo número de andares e Δh , os recalques máximos estavam na proporção de 1:3.

Em 1978-79, colocou-se uma sobrecarga temporária, de 20 MN, no lado menos recalçado do Edifício Excelsior (Pilares P52/53 da Fig. 2.3B), na tentativa frustrada de diminuir os recalques diferenciais e reaprumar o prédio. Por que o insucesso?

Além dos valores absolutos e diferenciais dos recalques, os engenheiros preocupavam-se também com a velocidade de seu desenvolvimento e com o adensamento secundário. Os valores do coeficiente de adensamento primário situavam-se na faixa de $5 \cdot 10^{-4}$ a $1 \cdot 10^{-3}$ cm²/s (Machado, 1961; Teixeira, 1960b), posteriormente alterados por Teixeira (1994) e Massad (1988d, 1999, 2004).

As inferências eram sempre prejudicadas pela presença de vigas de rigidez ligando as sapatas, o que provocava dúvidas quanto à hipótese de flexibilidade das fundações, e pela influência de edifícios vizinhos, construídos durante as medições dos recalques. Machado chegou a instalar

TAB. 2.2 RECALQUES DE ALGUNS EDIFÍCIOS DA CIDADE DE SANTOS

Edifício	N	Δh (m)	Recalques primários (mm)		Fonte
			900 dias	Máximos	
Unisanta	7 (10)	16,0	110	140	Gonçalves e Oliveira (2002a)
Edifício IA	8	13,5	113	121	Teixeira (1960b)
Edifício U	10	16,0	253	435	Teixeira (1960b)
3 edif. Macuco	12	9,0	60	—	Reis (2000)
Edifício C	12	12,0	315	345	Machado (1961)
Edifício D	12	12,0	274	315	Machado (1961)

N – número de andares e Δh é a espessura do estrato de argila mole (SFL)

a estimativa de s_u (*Vane Test*) da argila de Sergipe:

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{N_{kt}} \quad (5.14)$$

com $N_{kt} = 14,1$, onde q_t é a resistência de ponta corrigida do piezocone, e σ_{vo} , a pressão vertical total inicial. Para a argila do Sarapuí (RJ), Danziger (1990) obteve $N_{kt} = 8$ a 12.

Ao combinar-se a correlação de Kulhawy e Maine (1990), expressão (4.1), com as expressões (5.9) e (5.14), resulta:

$$N_{kt} = \frac{N_{\sigma t}}{0,3} = \frac{3}{0,3} = 10 \quad (5.15)$$

que deve ser tomada com cautela, por comportar variações em função da heterogeneidade das argilas de SFL. Por exemplo, para a região da Ilha Barnabé, em que $N_{\sigma t} = 3,9$ (Tab. 4.9), chega-se a $N_{kt} \cong 3,9/0,3 = 13$.

A partir da resistência do *Vane Test*, Coutinho et al. (2000) indicaram $N_{kt} \cong 13$, em média, para as argilas de Recife e, Sandroni et al. (1997), $N_{kt} \cong 10$ a 15, para a argila do Porto do Sergipe. Quanto à relação $s_u / \bar{\sigma}_a$, Futai et al. (2001) indicam faixa de valores 0,30 a 0,49 (Tab. 5.3).

Ao repetir a análise em dados de duas amostras indeformadas de AT, extraídas em Alemoa e submetidas a ensaios triaxiais CIU, Massad (1985a) obteve:

$$s_u / \bar{\sigma}_c = 0,30 \cdot RSA \quad \text{ou} \quad s_u / \bar{\sigma}_a = 0,30 \quad e$$

$$s_u / \bar{\sigma}_c = 0,40 \cdot RSA^{0,60} \quad (5.16)$$

para um universo de oito pontos.

Ângulo de atrito (ϕ') para $RSA = 1$

Para as argilas de Santos, com IP e teor de argila superiores a 50%, ensaios triaxiais lentos em oito amostras indeformadas (Apêndice 5.10) revelaram valores de ϕ' de

24° para os SFL, e, para as ATs, 19°, acima dos efeitos do pré-adensamento (Massad, 1985a). Argilas muito arenosas dessas duas unidades forneceram valores de até 28°. Os valores de ϕ' , inferidos dos ensaios K_o na condição normalmente adensada, estão na Tab. 5.6 com os correspondentes valores de ensaios triaxiais lentos. Apesar do pequeno número de ensaios, a aproximação é boa para as argilas de SFL.

Para a argila cinza mole, não ressecada, do Rio de Janeiro, Costa Filho et al. (1977) e Ortigão (1980) indicam parâmetros de resistência de 1,5 kPa e 25°, abaixo dos efeitos do sobreadensamento; acima desses efeitos, o ângulo de atrito efetivo é de 25° a 30° (Almeida et al., 2005). Para a crosta ressecada, Gerscovich et al. (1986) relatam valores de 1,5 kPa, 30° e 31°, respectivamente. Valores de ϕ' para outros solos da costa do Brasil estão indicados na Tab. 5.3.

5.3.5 Curvas de plastificação

As curvas de plastificação podem ser entendidas de um modo “físico” e experimental, sem apelar para conceitos matemáticos, que usualmente envolvem o assunto. “Acima” da linha dos ϕ' (Fig. 5.13), a curva de plastificação representa o critério de ruptura da argila intacta, e, “abaixo”, o limite entre o estado sobreadensado e normalmente adensado. A parte superior da curva pode ser obtida por ensaios triaxiais convencionais e a parte inferior, por ensaios triaxiais PN, isto é, mantendo constante a relação entre as tensões totais principais, ou ensaios triaxiais lentos. Os ensaios de K_o – coeficiente de empuxo em repouso – completam a delimitação da curva de plastificação.

Houve ensaios de amostras em quatro locais diferentes: duas de argilas de SFL (Cosipa e Vale do rio Jurubatuba) e duas de ATs (Iguape e Alemoa). A Fig. 5.13 mostra

as curvas obtidas pelo autor para argila transicional e argila de SFL. As coordenadas dos gráficos foram adimensionalizadas em relação às pressões de pré-adensamento, de valores muito diferentes: 350 kPa para a argila transicional e 60 kPa para a argila de SFL. Note-se que:

- os eixos das elipses, que são as formas aproximadas das curvas de plastificação, situam-se entre as retas do ϕ' e do K_0 , o que diferencia o modelo Ylight do modelo de Cam-Clay, do grupo de Cambridge (Schofield et al, 1968); em consequência, existe um ponto ou trecho comum à curva de plastificação e à reta $\bar{p} + q = \bar{\sigma}_a$;
- as curvas de plastificação cortam o eixo das abscissas num ponto que

$\bar{p} = 0,60 \cdot \bar{\sigma}_a$, como nos resultados obtidos por Tavenas e Leroueil (1977) para argilas moles de vários países;

- $q^{max}/\bar{\sigma}_a = 0,36$, para a argila de SFL, e 0,33 para a AT.

Os resultados ajustam-se àqueles obtidos para 50 argilas de 11 países (Fig. 5.14; adaptado de Diaz-Rodrigues, 1992 apud Leroueil, 1992).

Para as argilas de SFL (Mouratidis e Magnan, 1983), pode-se representar a forma aproximadamente elíptica dessas curvas, em função das variáveis auxiliares, x e y , a serem eliminadas, pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned} \bar{p} / \bar{\sigma}_a &= 0,963 \cdot (x + 0,405) - 0,271 \cdot y \quad (5.17) \\ q / \bar{\sigma}_a &= -0,271 \cdot (x + 0,405) + 0,963 \cdot y \\ 6,09 \cdot x^2 + 30,86 \cdot y^2 &= 1 \end{aligned}$$

Curvas de plastificação foram apresentadas por Almeida (1982, 2005) para a argila cinza mole do Sarapuú (RJ), e por Brugger et al. (1994), para uma argila mole de Sergipe.

5.4 Propriedades das argilas de SFL da cidade de Santos

Ao restringir-se a análise dos dados da cidade de Santos (Tab. 5.7; Massad, 2003), as conclusões citadas continuam válidas.

As propriedades-índice sobrepõem-se à da Baixada Santista, como um todo, o que não acontece com algumas das propriedades de estado, como o índice de vazios e a resistência não drenada, porque o adensamento das argilas de SFL na cidade de Santos ocorreu sob pressões maiores de terra.

5.5 Propriedades das areias

As areias pleistocênicas, que formam terraços alçados de 6 a 7 m em relação ao nível atual do mar, na Baixada Santista, com bom desenvolvimento em Cananeia e Santos,

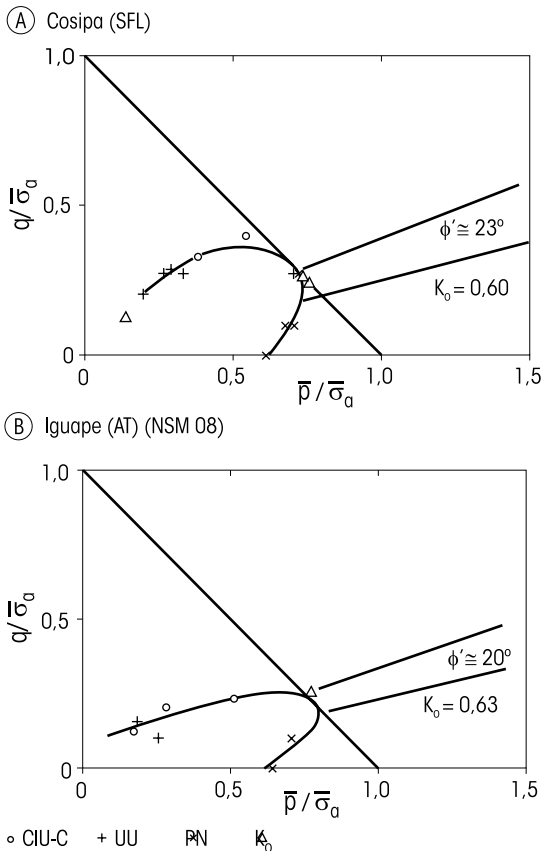


FIG. 5.13 Curvas de plastificação (Yielding)

Uma análise dos dados disponíveis mostra que o aterro de areia provocou o adensamento da argila mole antes do empilhamento do carvão. Nessas condições, tinha-se $RSA = 1$.

Com base nos valores dos recalques observados nos dois medidores de recalques (RN1 e RN2), a diversos períodos (Tab. 6.6), foi possível extrapolar o valor dos recalques finais e calcular o C_{vv} pelo método gráfico de Asaoka (Tab. 6.1).

Pela pequena espessura da camada superior de argila mole, admitiu-se que os seus recalques tenham se desenvolvido nos

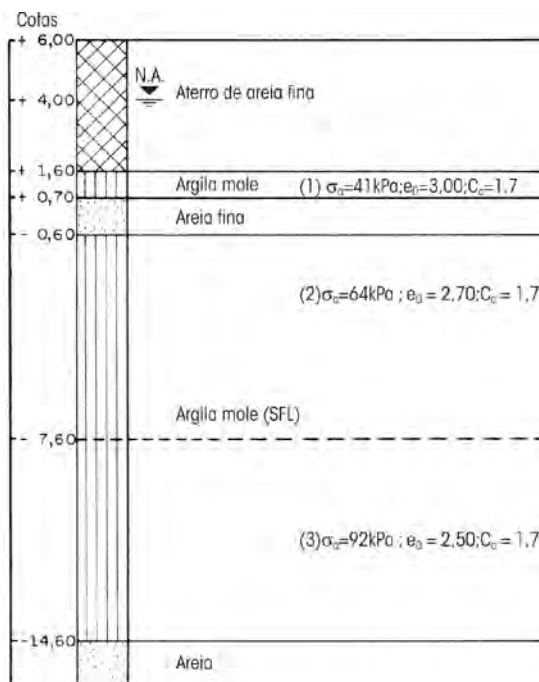


FIG. 6.13 Perfil de sondagens – Pátio de Carvão, Cosipa

TAB. 6.6 PÁTIO DE CARVÃO

Período (dias)	Recalques medidos (cm)	
	RN 2	RN 3
16	28	34
47	35	40
132	45	50
216	48	53

primeiros 16 dias. A hipótese é plausível, pois os recalques finais, estimados pelo método mais pessimista, foram da ordem de 20 cm, portanto, inferiores aos observados na data (Sousa Pinto et al., 1978).

Uma comparação entre os recalques finais estimados e observados mostra que, mesmo com $RSA = 1$, o método convencional de cálculo com base no C_c superestima os recalques finais. Os parâmetros geotécnicos de compressibilidade utilizados foram extraídos das Tabs. 5.20 e 5.22.

Quanto aos C_{vv} de campo, constatam-se valores tão elevados quanto $1 a 3 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$, 80 vezes o valor médio de laboratório.

Itapema (Canal de Bertioga)

Em 1963, foi construído um aterro experimental com a seção transversal indicada na Fig. 6.14A, a 200 m do Canal de Bertioga, do lado do Guarujá. O aterro ocupava uma área em planta de $40 \times 100 \text{ m}^2$, e a única sondagem disponível no local está na Fig. 6.14B.

Pelas informações da região, trata-se de sedimentos fluviolagunares e de baías (SFL), até pelo menos 20 m de profundidade, quando a argila marinha passa a ter uma consistência mais elevada. Seriam resquícios de sedimentos mais antigos, argila transicional (AT)? De qualquer forma, nota-se uma “discordância” entre os dois sedimentos.

Instalaram-se medidores de recalques ao longo do eixo e nas laterais do aterro experimental (Tab. 6.7).

Uma análise dos resultados apresentados na Tab. 6.1 confirma que o efeito do sobre-adensamento é bastante acentuado nos recalques finais, e, nesse caso, $\bar{\sigma}_v / \bar{\sigma}_{v0}$ é da ordem de grandeza da RSA . Os parâmetros geotécnicos utilizados estão nas Tabs. 5.10, 5.20 e 5.22. A Tab. 6.1 também mostra os valores de C_{vv} de campo, obtidos pelo

método gráfico de Asaoka. Só as placas P1 e P2 estão no eixo longitudinal, mas nas bordas do aterro, ao que tudo indica, houve o início de um processo de plastificação, que afetou as curvas recalque-tempo.

Conclui-se que o valor médio para o C_{vv} é de $3 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$, 15 vezes maior do que o correspondente valor de laboratório.

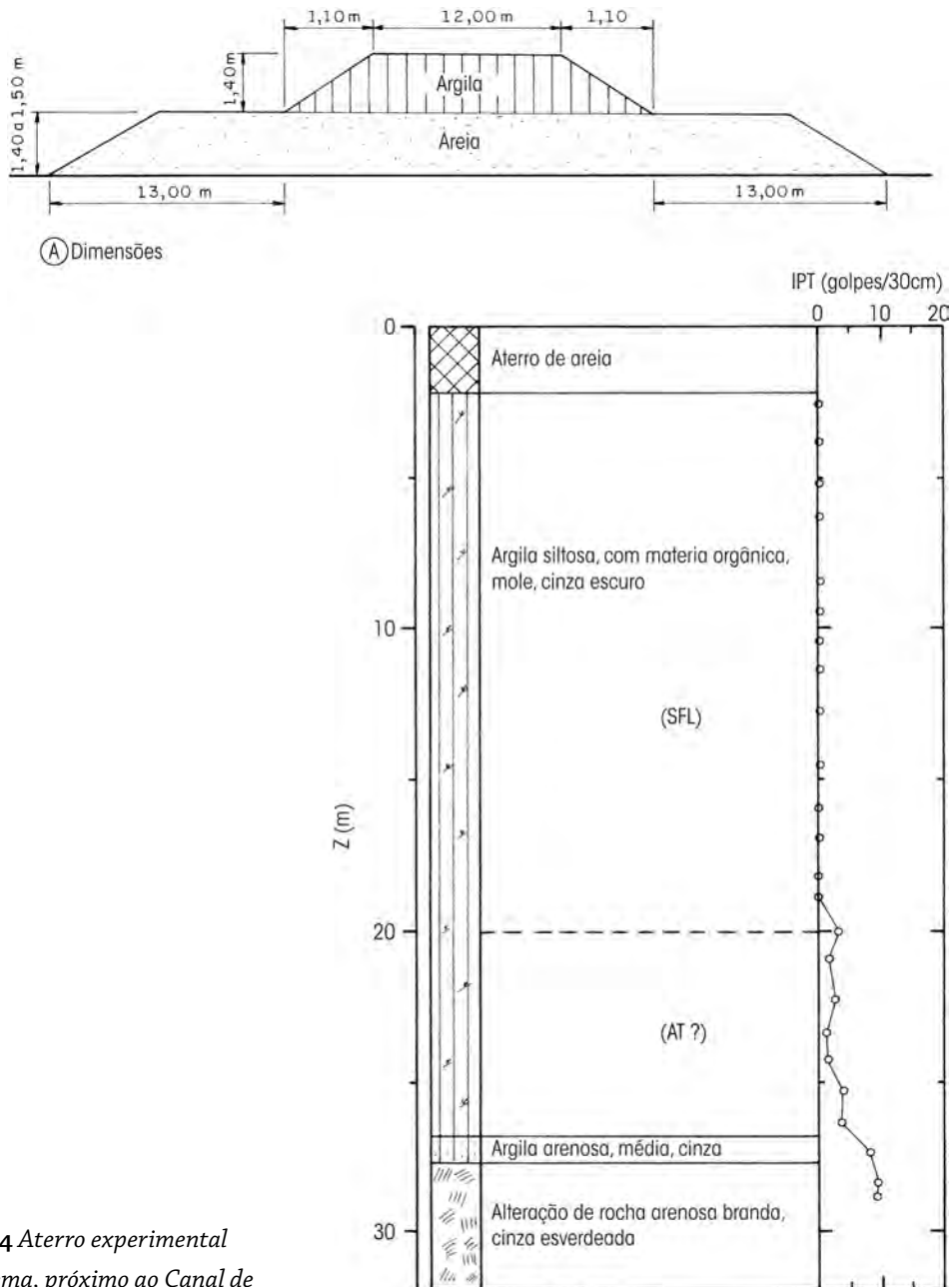


FIG. 6.14 Aterro experimental em Itapema, próximo ao Canal de Bertiooga