

EFEITOS DELETÉRIOS NAS EDIFICAÇÕES E NA INFRA-ESTRUTURA CAUSADAS PELA URBANIZAÇÃO ACELERADA EM UMA MICRO-REGIÃO DE SÃO PAULO: UM ESTUDO DE CASO

Eng. Eduardo Rottmann, M.Sc., E.P.U.S.P., IBAPE-SP¹

RESUMO

Esse trabalho apresenta um estudo de caso sobre uma micro-região urbana da cidade de São Paulo, onde a ocorrência de danos em elementos construtivos apoiados em fundações superficiais encontra-se justificada por considerações teóricas da Mecânica dos Solos clássica. No desenvolvimento do trabalho, foram consultados documentos topográficos antigos e boletins de sondagens realizadas ao longo do tempo na região, que permitiram definir elementos técnicos que embasaram a análise empreendida. Nessa, observou-se que as camadas de argila sedimentar terciária inferiores tem comportamento sobre-adensado, esperando-se pouca influência nos recalques superficiais por adensamento devidos às mesmas, fato diverso do que ocorre com uma camada superficial de argila orgânica mole, da qual devem se esperar elevados recalques por adensamento, inclusive secundários.

DAMAGING EFFECTS ON BUILDINGS AND ON INFRASTRUCTURE CAUSED BY ACCELERATED URBAN GROWTH IN A MICRO-REGION OF SÃO PAULO: A CASE STUDY

ABSTRACT

This paper presents a case study about an urban micro-region in São Paulo city, where damage in building components on direct foundations could be justified by classic Soil Mechanics' theories. The definition of technical elements that supported the analysis were allowed by old maps and soil borings. It was also observed that layers of São Paulo sedimentary tertiary clay present over-consolidated behavior, thus tending to show small superficial settlements, while soft organic clay present a much different behavior, leading to large consolidation settlements, including secondary ones.

¹ Colaboraram Henrique José Itzcovici e Karen Yukari Yokoyama.

I. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização e verticalização acelerados nos grandes centros urbanos brasileiros constituem pauta comum de discussão no meio dos profissionais focados ou de alguma forma envolvidos com o tema, como urbanistas, incorporadores, arquitetos e engenheiros, em suas várias modalidades de atuação, como nos correspondentes meios acadêmicos. Suas decorrências, do ponto de vista da engenharia de solos, são bastante conhecidas de todos: rebaixamento de lençol freático pelo aumento de impermeabilização do solo urbano e pela ocupação do subsolo; aplicação de sobrecargas pela construção de edifícios altos e pelo aumento de tráfego associado à maior densidade populacional; surgimento de recalques em edificações antigas, dentre outras.

Embora tais efeitos sejam amplamente conhecidos, e por vezes freqüentemente não apenas as páginas das publicações técnicas, mas também as mídias escrita e falada, bem como os autos judiciais, são raras as descrições de tais casos que não se atenham apenas ao caráter meramente qualitativo, quando muito procurando estabelecer umnexo causal com os efeitos observados. O presente trabalho, através de um estudo de caso, propõe-se a associar à anamnese de tal tipo de ocorrência, um embasamento técnico e conceitualmente justificado.

II. MOTIVAÇÃO E EVIDÊNCIAS

Enseja o presente trabalho a ocorrência, no segundo semestre de 2003, de um autêntico “fenômeno urbano”: o recalque de um trecho de via pública no bairro de Moema, Zona Sul de São Paulo, o qual, segundo informações locais, atingiu até *40 cm*, implicando em intensas obras de recuperação da via pública e seus passeios, além de danos a muros e fechamentos de imóveis particulares.

O trecho em questão, indicado no mapa da Figura I.1, encontra-se na Av. dos Jamaris, entre as Alamedas dos Nhambiquaras e dos Anapurús. A Av. dos Jamaris é travessa da Av. Ibirapuera, hoje importante eixo comercial da região, onde se concentram diversos empreendimentos comerciais de alto padrão, inclusive movimentado shopping center. Sua ocupação, bem como das vias adjacentes, tem caráter misto, representado por edifícios altos

residenciais de bom padrão e comércio local (com frequência instalado em antigas residências adaptadas).

Conforme constatado na região, embora tais danos se tenham manifestado de forma mais intensa naquele trecho específico, *existem evidências de que o problema é mais amplo*, caracterizando uma pequena “bacia”, o que pode ser verificado por anomalias em pavimentos e muros, conforme ilustrado nas fotos a seguir.

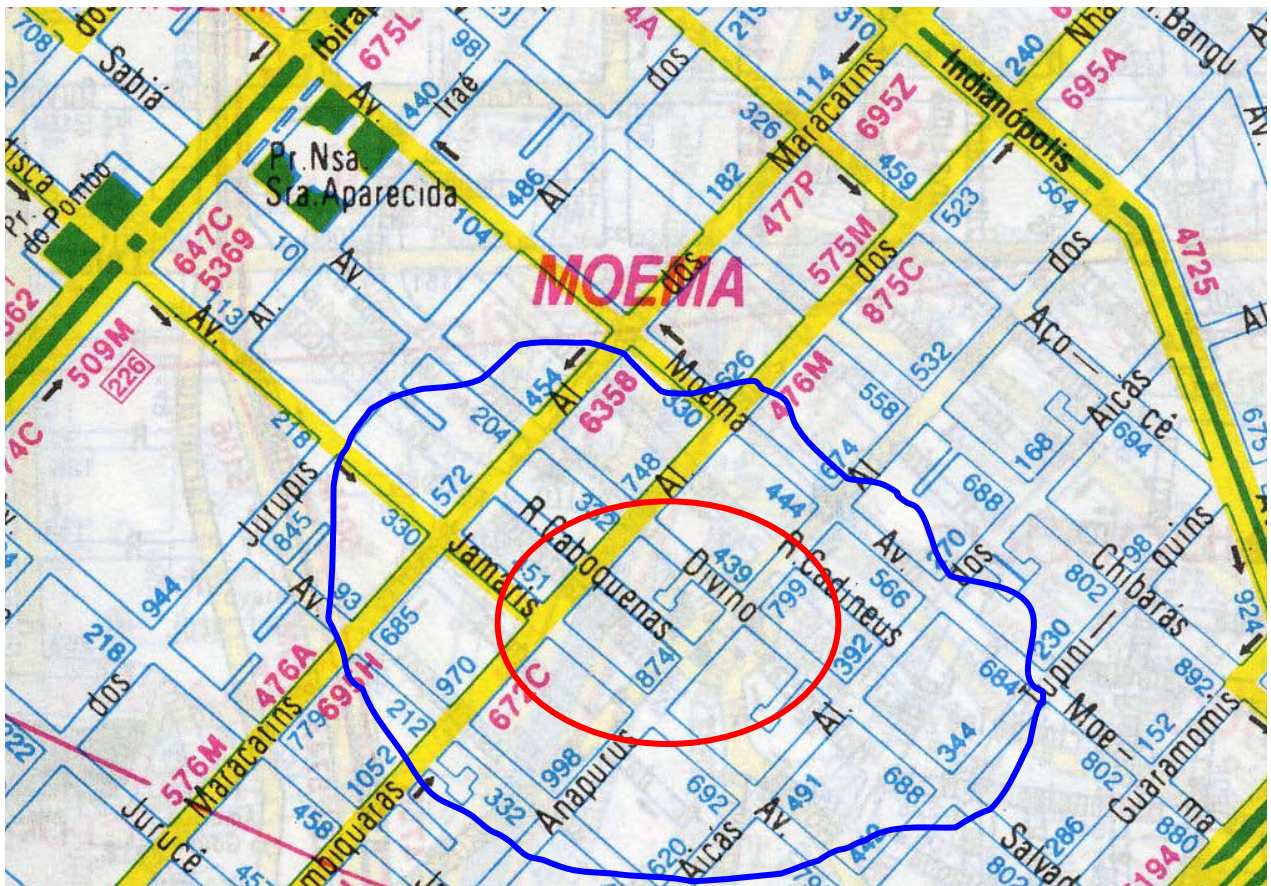


Figura I.1 – Mapa da região, indicando ponto de manifestação dos problemas e localização aproximada da “bacia”.



Fotografia 1 – Vista das obras de recuperação, na esquina da Av. dos Jamaris com Al. dos Nhambiquaras



Fotografia 2 – Vista da calçada recomposta e do muro de fechamento demolido, na Av. dos Jamaris



Fotografia 3 – Vista do trecho da Av. dos Jamaris interrompido



Fotografia 4 – Mureta com evidências de recalque, na Av. dos Jamaris



Fotografia 5 – Caixa de inspeção mostrando recalque, na Av. dos Jamaris



Fotografia 6 – Mureta destacada e com rachaduras em edifício da Av. dos Jamaris



Fotografia 7 – Gradil na Al dos Anapurús apresentando ondulações



Fotografia 8 – Muros e calçadas mostrando acomodação, na Al. dos Nhambiquaras



Fotografia 9 – Vista da Rua Caboquenas, entre Al. dos Anapurús e Al. dos Nhambiquaras, mostrando ondulações e reparos feitos no pavimento



Fotografia 10 – Cruzamento da Al. dos Anapurús com a Av. dos Jamaris, mostrando ondulações e reparos feitos no pavimento

III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

III.1. Recalques em fundações sobre camadas argilosas e seus mecanismos teóricos

Os solos, do ponto de vista reológico, apresentam comportamento de forma geral elasto-plástico, sendo que suas deformações, dada a sua condição de meios porosos, estão associadas a alterações de seus índices de vazios.

As deformações elásticas apresentam caráter *instantâneo* e são teoricamente recuperáveis, isto é, quando da remoção das cargas aplicadas, o corpo que recebeu os esforços recupera as suas dimensões originais. Fato diverso ocorre quando os esforços aplicados levaram em certos pontos à ocorrência de tensões superiores a um *limite de proporcionalidade* entre tensões e deformações, ou seja, *quando da remoção das cargas aplicadas registram-se necessariamente deformações não recuperáveis*. No caso de solos argilosos, parte dessas deformações tem caráter lento, devido ao fenômeno do **adensamento** de tais solos.

Do ponto de vista de fundações pouco profundas, o recalque total possível é costumeiramente definido como a soma de três parcelas, conforme a fórmula III.1., a seguir:

$$S = S_e + S_a + S_s \quad \text{(III.1)}$$

Onde:

S_e = Corresponde ao **recalque inicial**, de caráter imediato ou **elástico**;

S_a = Corresponde ao **recalque lento**, atribuído ao fenômeno de **adensamento primário** das camadas argilosas;

S_s = Corresponde ao **recalque secular**, atribuído ao fenômeno de **adensamento secundário** das camadas argilosas.

A Figura III.1, a seguir, ilustra de forma gráfica a evolução de tais recalques ao longo do tempo.

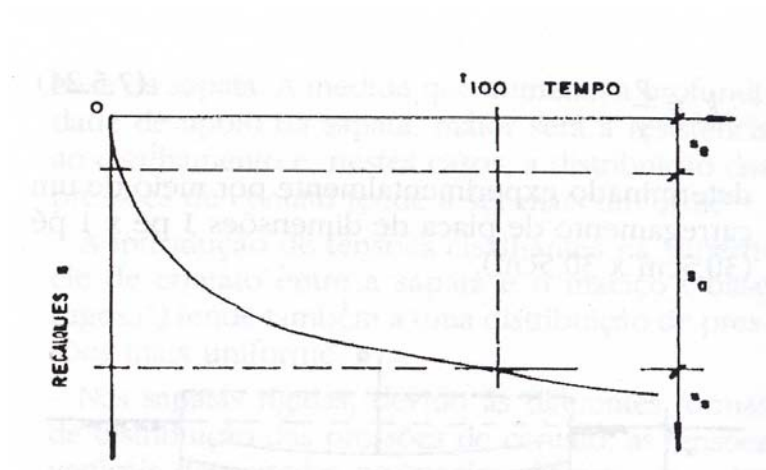


Figura III.1 – Evolução do recalque com o tempo. (apud Teixeira e Godoy, in Fundações:Teoria e Prática)

O adensamento primário das argilas foi inicialmente explicado por Terzaghi, e corresponde praticamente ao primeiro desenvolvimento teórico da Mecânica dos Solos. Tal fenômeno decorre da *expulsão* da água dos interstícios existentes no interior dos solos argilosos, o que é de sobremaneira lento, dada à sua baixa permeabilidade. A analogia mecânica de Terzaghi é particularmente didática, e a posterior apresentação feita por Taylor, em 1948, já tem caráter clássico, e é reproduzida na Figura III.2, a seguir.

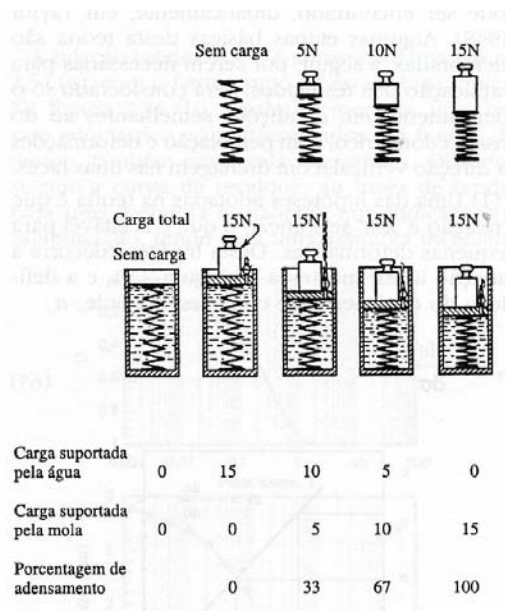


Figura III.2 – Analogia mecânica para o processo de adensamento, segundo Terzaghi (Taylor, 1948). (apud Sousa Pinto, in Fundações:Teoria e Prática)

Nesse processo, verifica-se uma *gradual transferência* da sobrecarga imposta ao sistema da água para a mola, crescente à medida que o escoamento vai ocorrendo pelo orifício do pistão, até que finalmente a mola termina por equilibrar totalmente a sobrecarga aplicada. Tal situação é análoga ao ocorrido em um maciço argiloso onde gradualmente vão se dissipando pressões neutras (isto é, hidrostáticas) geradas por uma dada sobrecarga aplicada.

O comportamento reológico das argilas depende da “memória geológica” das mesmas, isto é, do seu histórico de sobrecargas. Tais sobrecargas são devidas a antigos carregamentos associados a, por exemplo, camadas geológicas hoje erodidas ou, em algumas partes do mundo, a antigas geleiras. Esta memória é detectável pela chamada “**tensão de sobre- adensamento**” ou de “**cedência**” (σ'_p), que é caracterizada em um gráfico monologaritmico de índice de vazios (e) contra pressões aplicadas por um ponto de deflexão na curva, como pode ser observado no gráfico mostrado na Figura III.3, abaixo. Quando as tensões verticais devidas ao carregamento geostático inicial aplicadas ao maciço, ou à camada, em análise (σ'_{vo}) são menores ($\sigma'_{vo} < \sigma'_p$) que a tensão de sobre- adensamento, a argila em questão é chamada de **sobre- adensada**. Na situação inversa ($\sigma'_{vo} > \sigma'_p$), a argila é chamada de **normalmente adensada**, e o seu comportamento de deformação obedece à chamada **reta** (ou **curva**) **virgem**. A tensão de sobre- adensamento corresponde a um ponto ideal obtido geometricamente de tal gráfico, sendo costumeiramente usados no Brasil os métodos gráficos de Casagrande e de Pacheco Silva. A razão entre o carregamento geostático σ'_{vo} e a tensão de sobre- adensamento σ'_p é chamada de **razão de sobre- adensamento**, ou *over consolidation ratio (OCR)*.

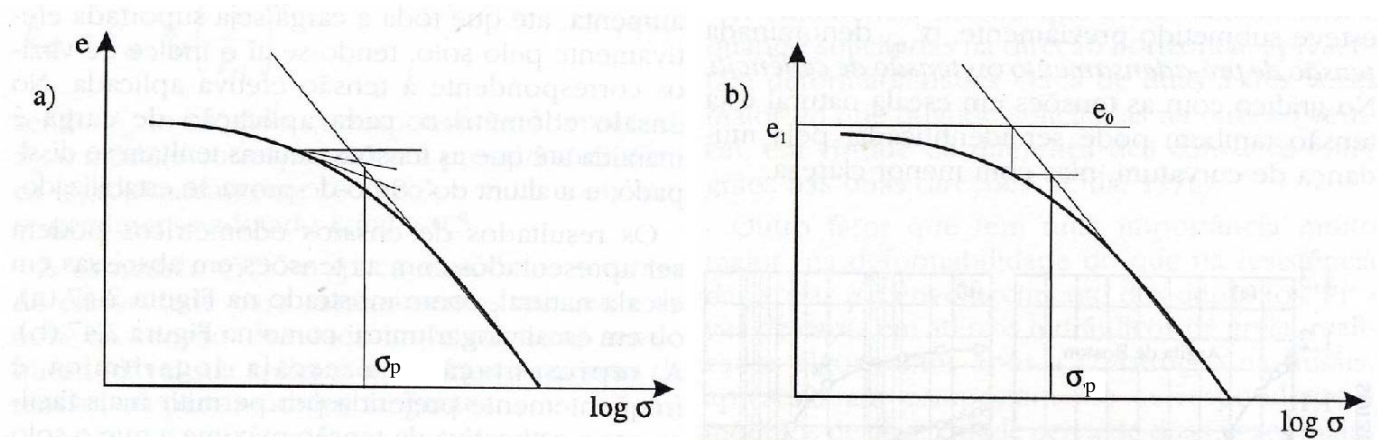


Figura III.3 – Gráfico de variação do índice de vazios das argilas com o logaritmo das tensões verticais e determinação de σ'_p pelos: (a) método de Casagrande; (b) método de Pacheco Silva. (apud Sousa Pinto, in Fundações: Teoria e Prática)

Segundo a teoria clássica de Terzaghi, portanto, os recalques por adensamento em solos argilosos devem se estabilizar em um horizonte finito de tempo (ao cabo da dissipação das pressões neutras introduzidas pelo sobrecarregamento da camada em análise), tendo tais deformações mais ou menos acentuadas em função da história geológica local (condição de *argila normalmente adensada* ou *sobre-adensada*).

Quando da aplicação de uma nova sobrecarga (σ'_z) a uma camada argilosa a ser analisada, deve-se, portanto, verificar se:

- a) no estado de tensões iniciais (σ'_{v0}), a camada encontrava-se em condição sobre-adensada, ou normalmente adensada;
- b) no estado de tensões final ($\sigma'_z + \sigma'_{v0}$), qual a condição obtida, sobre-adensada ou normalmente adensada.

A Figura III.4, a seguir, ilustra de forma gráfica tal verificação.

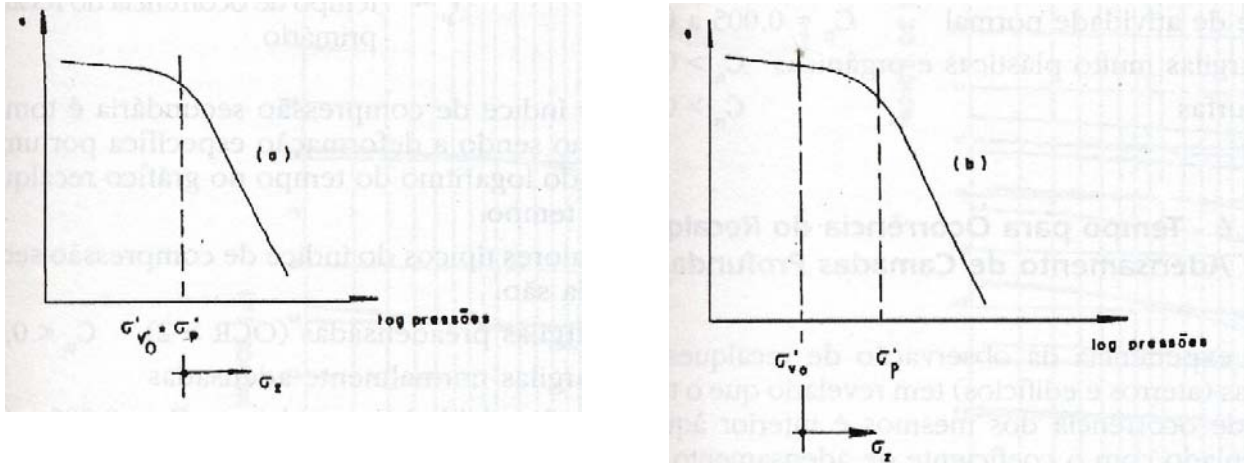


Figura III.4 – Acréscimo de tensão nos casos de: (a) argilas normalmente adensadas; (b) argilas sobre-adensadas. (apud Teixeira e Godoy, in Fundações:Teoria e Prática)

Decorrem, portanto, duas condições de comportamento:

- a) se $\sigma'_{vo} < \sigma'_p$, quando $\sigma'_z + \sigma'_{vo} \geq \sigma'_p$ a camada de argila deformatar-se-á segundo a reta de menor declividade (*deformações mais discretas - condição sobre-adensada*) até atingir a tensão σ'_p , a partir da qual deformatará segundo a reta de maior declividade (*deformações mais intensas - condição normalmente adensada*), sendo a deformação final a soma de ambas as parcelas;
- b) se $\sigma'_z + \sigma'_{vo} < \sigma'_p$, a camada de argila se deformatará apenas segundo a reta de menor declividade (*deformações mais discretas - condição sobre-adensada*).

A determinação da tensão de sobre-adensamento ou de cedência é particularmente difícil quando não se realizam ensaios laboratoriais adequados por ocasião de um estudo geotécnico. Existem, entretanto, correlações empíricas publicadas na literatura, que devem ser aplicadas de forma restrita. Para o caso das argilas terciárias de São Paulo, dados colhidos quando da realização das obras do Metrô conduziram à seguinte correlação, que pode ser usada em uma primeira aproximação:

$$\sigma'_p = 0,03 N + 0,17 \quad (\text{MPa}) \quad (\text{III.2})$$

Onde:

N = Número de golpes verificado em sondagens realizadas com o amostrador SPT.

Estudos experimentais posteriores à teoria de adensamento de Terzaghi, também já clássicos, *indicam a continuidade do desenvolvimento das deformações mesmo após se ter atingido a condição de equilíbrio de tensões prevista com a dissipação das pressões neutras*. Tal fenômeno é denominado de **adensamento secundário**, e corresponde à *fluência* observada em outros materiais estudados pela mecânica estrutural.

Conforme o Prof. Carlos de Sousa Pinto:

“Deformação lenta ocorre em todos os materiais, mas nos solos ela é mais notável em virtude das transmissões de forças pelos contactos entre partículas (grifo nosso). Parte das forças são transmitidas pelos contactos entre minerais argila, que se dão pela água adsorvida, conforme descrito em 2.2.4². Com o tempo, alguns destes numerosíssimos contactos se desfazem, descarregando as forças para contactos vizinhos, com pequenos deslocamentos.”

Este tipo de adensamento (*que conduz aos chamados recalques seculares*) é mais pronunciado nos solos argilosos muito plásticos e orgânicos, *embora também ocorra nas argilas sobre-adensadas e nas normalmente adensadas*. Matematicamente, este fenômeno, segundo estudos experimentais, pode ser expresso pela equação III.3, a seguir.

$$S_s = C_\alpha \cdot H \cdot \log \frac{ts}{tp} \quad \text{(III.3)}$$

Onde:

C_α = Índice de compressão secundária;

H = Espessura da camada de argila em análise;

ts = tempo de referência considerado na análise do recalque secundário (por exemplo, a vida útil da obra);

tp = tempo de ocorrência do recalque primário;

Conforme apontado na literatura, são valores típicos do índice de compressão secundária:

² Onde se descreve o sistema solo-água.

- Para argilas sobre-adensadas ($OCR > 2$): $C_\alpha < 0,001$
- Para argilas normalmente adensadas: $C_\alpha = 0,005$ a $0,02$
- Para argilas muito plásticas e orgânicas: $C_\alpha > 0,03$
- Para turfas: $C_\alpha > 0,08$

III.2. Causas possíveis das variações de estados de tensões

Em ambientes urbanos (como o de interesse para o presente estudo de caso), as sobrecargas em camadas de solo são introduzidas principalmente por três fatores específicos:

- a) Pela introdução de *carregamentos estáticos adicionais associados à construção de edifícios altos*, que podem provocar recalques nas fundações de construções próximas pré-existentes pela ocorrência dos chamados “bulbos de tensões”. Por esses “bulbos”, as tensões adicionais se propagam não apenas *verticalmente*, mas também *horizontalmente*, propagando assim também as deformações, como esquematizado na Figura III.5, a seguir. Observe-se que tais “bulbos” têm *extensão limitada* a um perímetro no entorno do centro de cargas a ele correspondente.

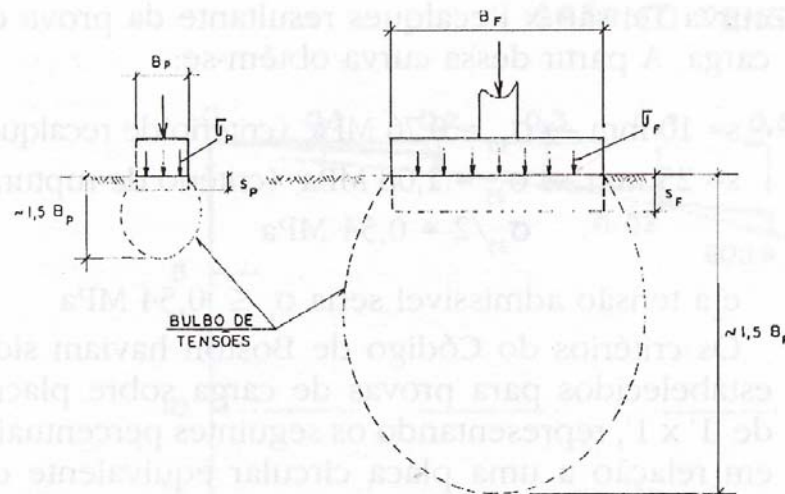


Figura III.5 – Bulbos de tensões característicos em fundações rasas. (apud Teixeira e Godoy, in Fundações: Teoria e Prática)

- b) Pelo aumento de tensões efetivas no solo associado ao *rebaixamento (temporário ou permanente) do lençol freático*. Tal condição corresponde a uma sobrecarga **real** equivalente à pressão piezométrica do nível d’água rebaixado, conforme se pode observar da dedução a seguir, que reflete a condição apresentada na Figura III.6.

$$\sigma'_{v0} = (\gamma_1 - \gamma_a) H_1 + (\gamma_1 - \gamma_a) .0,5 H_2$$

$$\sigma'_{v2} = \gamma_1 .H_1 + (\gamma_1 - \gamma_a) .0,5 H_2$$

Decorre:

$$\Delta\sigma' = \sigma'_{v0} - \sigma'_{v2} = \gamma_a .H_1 \quad (\text{III.4})$$

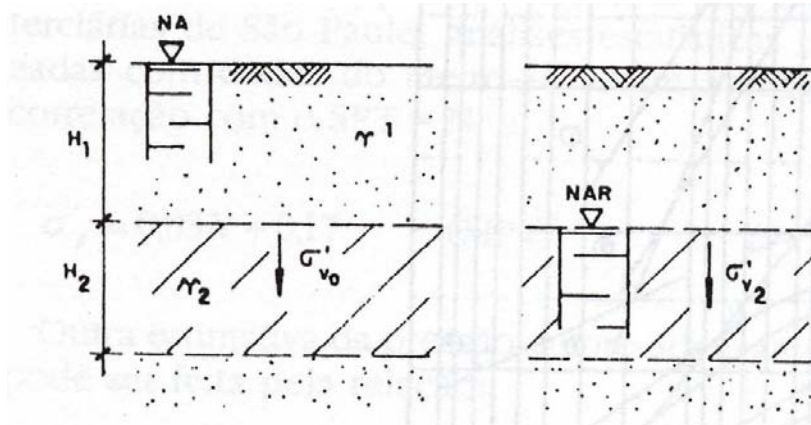


Figura III.6 – Aumento das tensões efetivas no solo devido ao rebaixamento do nível de água freático. (apud Teixeira e Godoy, in Fundações:Teoria e Prática)

- c) Pela ocorrência de *carregamentos dinâmicos superficiais*, associados ao aumento de tráfego. Embora a dinâmica dos solos já seja disciplina desenvolvida no meio técnico, tais estudos (*onde se analisam efeitos da propagação de ondas de cisalhamento em maciços terrosos*) têm ainda caráter bastante acadêmico ou restrito à análise de fundações especiais (como o necessário para equipamentos mecânicos de grande porte), desconhecendo o autor a existência de parâmetros publicados, baseados na prática brasileira, associados ao tráfego urbano. Os equipamentos para a mensuração dos parâmetros necessários a tal tipo de análise, apesar de disponíveis em alguns institutos de pesquisa, são bastante específicos, e de uso raro em casos cotidianos da Engenharia de Fundações. Desta forma, embora teoricamente possível, ficará de lado, neste trabalho, qualquer consideração técnica específica sobre esse tema.

IV. ANÁLISE DO CASO COM BASE EM ELEMENTOS TÉCNICOS

IV.1 A evolução da urbanização regional

A região de Moema urbanizou-se a partir da década de 1930, induzida em boa parte pela passagem do antigo bonde de Santo Amaro, que transitava pela atual Av. Ibirapuera. Até a década de 1970, nela prevaleceu a ocupação unifamiliar de baixa densidade, entremeada por algumas fábricas e comércio local, caracterizando um “arrabalde de classe média”, quando, por volta de 1975, criou-se um grande pólo indutor de sua ocupação atual, o Shopping Center Ibirapuera. Desde então, o bairro vem sofrendo intensa e contínua verticalização, explicada por sua boa inserção urbana, próximo a importantes vias de acesso à região central e às novas polaridades que são Santo Amaro e a Marginal do Pinheiros (como as avenidas Juscelino Kubitscheck, 23 de Maio, Rubem Berta e Ibirapuera, além das mais antigas Santo Amaro e Ibirapuera) e a importantes “equipamentos urbanos”, como o Parque do Ibirapuera e o Aeroporto de Congonhas. Essa verticalização se processa principalmente no uso residencial, embora também ocorra forte presença do terciário, seja pela construção de modernos edifícios de escritórios, como pela transformação de antigas residências em comércio, normalmente de elevado padrão. Tais transformações urbanas são visíveis nas imagens aéreas I e II, datadas respectivamente de 1996 e 2003, apresentadas em anexo.

Além dessas imagens, foram levantados outros elementos mais antigos, obtidos em arquivos públicos, a saber:

- a) Restituição do levantamento aerofotogramétrico feito pela empresa SARA-Brasil, sob contrato da Prefeitura Municipal, datado de 1932, obtido no Departamento de Patrimônio Histórico do Estado;
- b) Restituição do levantamento aerofotogramétrico realizado pela Secretaria de Negócios Metropolitanos/Emplasa, datado de 1981.

A observação de tais elementos permite algumas constatações de interesse:

- a) A urbanização da região, bastante esparsa em 1932, como se pode perceber pelo pequeno número de edificações indicado nessa planta, já nessa época interferiu em sua drenagem natural, *seccionando* córregos. É notável nas várias imagens a

persistência do córrego Uberabinha, afluente do Uberaba (hoje canalizado sob a Av. Hélio Pellegrino), que cruza a Av. Santo Amaro à altura da Rua Periquito e prossegue visível ainda na restituição de 1981 até o entrocamento das atuais Avenida Ibaú com Alameda Jauaperi. Pela restituição de 1932, esse córrego continuava até a então linha do “Tramway de Santo Amaro”, que claramente o seccionava. As Figuras IV.1 e IV.2, a seguir, mostram em detalhe tal situação. Note-se a alteração da toponímia viária.

- b) Mais um detalhe pode ser observado na Figura IV.2, onde estão denotadas de forma clara as curvas de nível: a partir do entrocamento do eixo desse córrego com a atual Av. Ibirapuera derivam duas linhas de ravina bem caracterizadas, rumo à Avenida Rubem Berta, possivelmente indicativos de dois antigos braços de contribuição, seccionados do corpo principal quando da construção da “linha do tramway”. As possíveis diretrizes de tais ravinas encontram-se também indicadas na Figura IV.2.
- c) Outro detalhe de interesse para a presente análise, também denotado na Figura IV.1, é a existência de **matas** nas quadras definidas pelas atuais Avenidas dos Jamaris, Divino Salvador e Moema, Rua Caboquenas e Alamedas dos Anapurús e dos Nhambiquaras. Note-se que a Rua Caboquenas era ainda inexistente, e a Av. Divino Salvador apresentava seu traçado ainda indefinido (tracejado, no mapa). As curvas de nível, embora pouco claras, são em linhas gerais convergentes com as da restituição de 1981, caracterizando as mesmas ravinas. Tais elementos sugerem a existência, ainda em 1932, de mancha remanescente de antiga mata ciliar, ou talvez de reflorestamento em eucaliptos. A verificação de imagens cronologicamente próximas, infelizmente não disponíveis, permitiria a confirmação mais efetiva dessa hipótese.

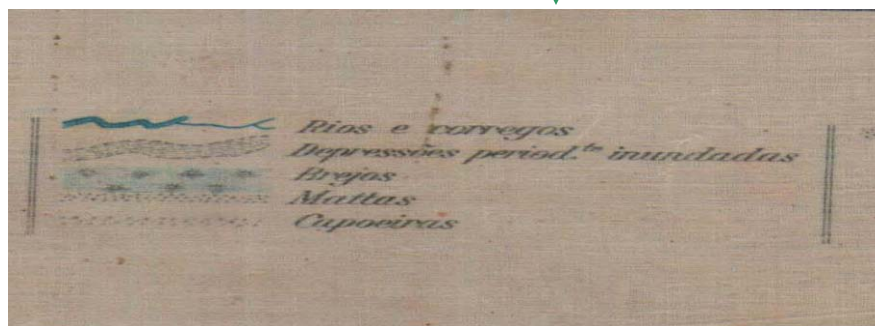
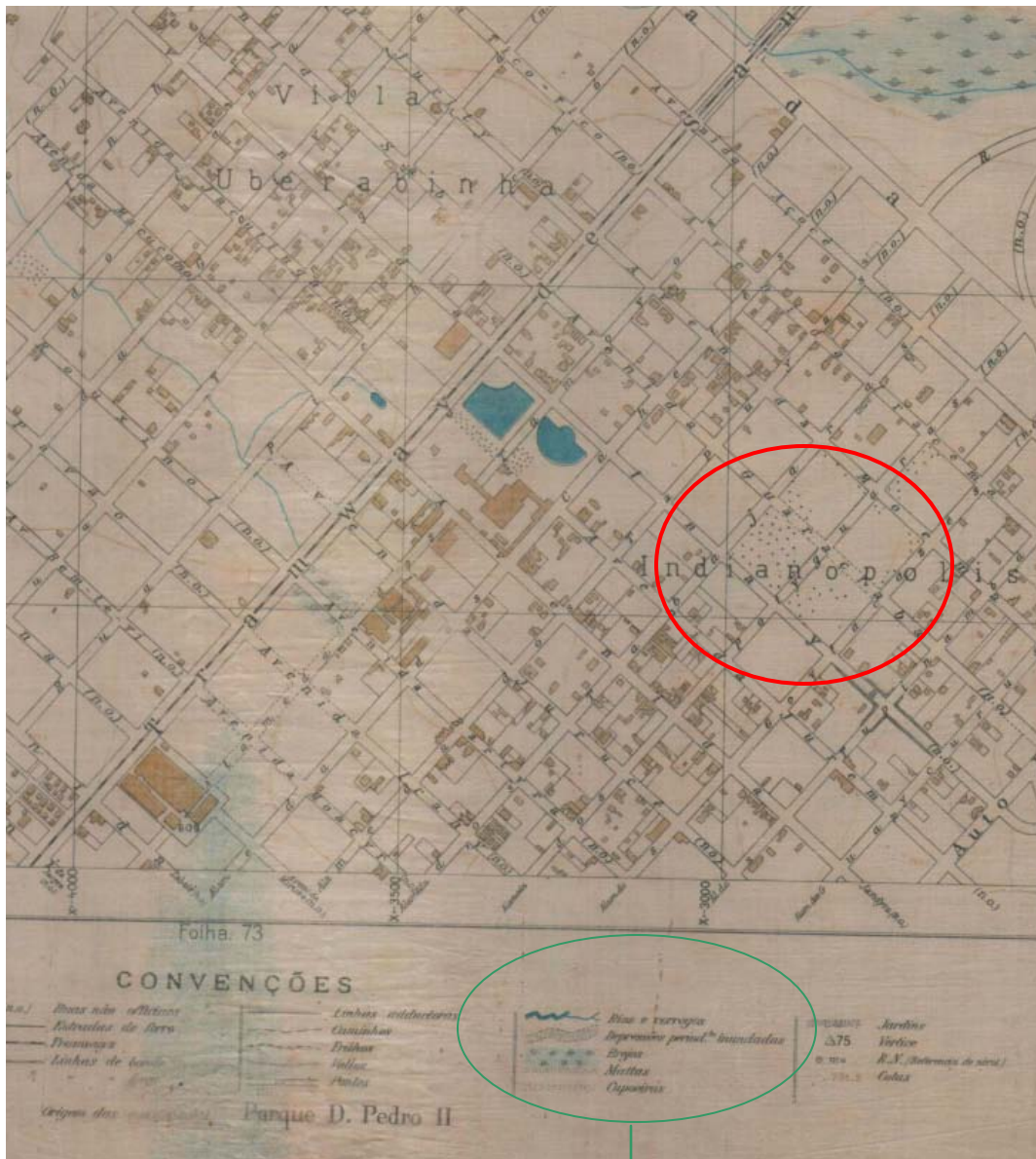


Figura IV.1 – Detalhe da restituição do SARA-Brasil (1932). Observar interrupção do afluente do Córrego Uberaba pela linha de bonde e indicação de mata.

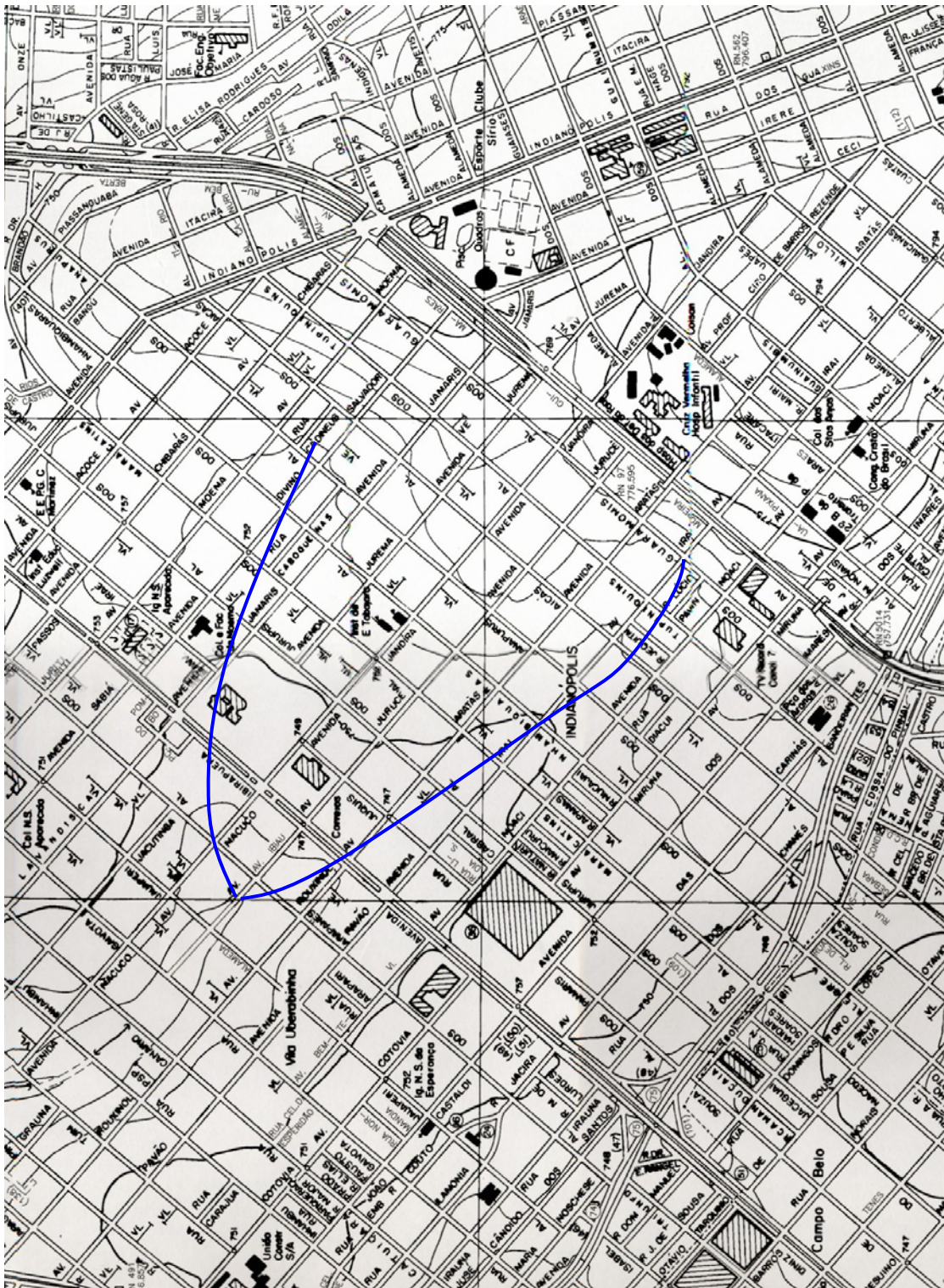


Figura IV.2 – Detalhe da restituição SNM/Emplasa (1981). Observar linhas de ravina.

IV.2. Perfil geológico característico

Da análise de perfis de sondagens levantados nas imediações da Avenida dos Jamaris, foi possível inferir-se algumas características gerais:

- a) A região caracteriza-se pela ocorrência de camadas de areia entremeadas com outras de argila, de espessura, compacidade ou consistência variáveis, sendo que o lençol freático é historicamente alto na região, com tendência de rebaixamento devido à crescente impermeabilização do solo superficial. Informes de antigos moradores locais dão notícias de que esse rebaixamento teria sido particularmente intenso nos últimos três anos.
- b) Existe uma camada sobrejacente de argila orgânica com espessura variável tipicamente de 2,0 a 4,0 metros, com detritos vegetais, muito mole, de cor preta. Sobre essa camada é comum a existência de uma camada de cerca de 1,0 metro de espessura de aterro de regularização.
- c) Um perfil entendido como “típico” da região é apresentado na Figura IV.3, a seguir, devendo-se ressaltar que esse entreamado de camadas de areia e argila facilita a drenagem das últimas, e o seu decorrente adensamento.
- d) Na mesma figura são apresentadas algumas grandezas de interesse para a presente análise, calculadas para as cotas médias das camadas de argila, especificamente σ'_{vo} (tensões efetivas geostáticas iniciais) e p_p (tensão de sobre-adensamento, calculadas em função do SPT médio de cada camada, pela fórmula III.2, acima).
- e) Para o caso específico da camada de argila orgânica, a mesma tem comportamento normalmente adensado. O Prof. Carlos de Sousa Pinto tece importantes comentários sobre essa tipologia:

“São chamados solos orgânicos aqueles que contém uma quantidade apreciável de matéria decorrente de decomposição de origem vegetal ou animal, em vários estágios de decomposição. Geralmente argilas ou areias finas, os solos orgânicos são de fácil identificação, pela cor escura e pelo odor característico. (...)

Solos orgânicos geralmente são problemáticos por serem muito compressíveis. Estes solos são encontrados no Brasil principalmente nos depósitos litorâneos, em espessuras de dezenas de metros, e nas várzeas dos rios e córregos, em camadas de 3 a 10 m de espessura. (...) Por sua característica orgânica, apresentam elevados índices de vazios, e por serem de sedimentação recente, normalmente adensados, possuem baixa capacidade de suporte e considerável compressibilidade.

Em algumas formações, ocorre uma considerável concentração de folhas e caules em processo incipiente de decomposição, formando as turfas. São materiais extremamente deformáveis, mas muito permeáveis, o que permite que os recalques, devidos a carregamentos externos, ocorram rapidamente.” (grifos do autor)

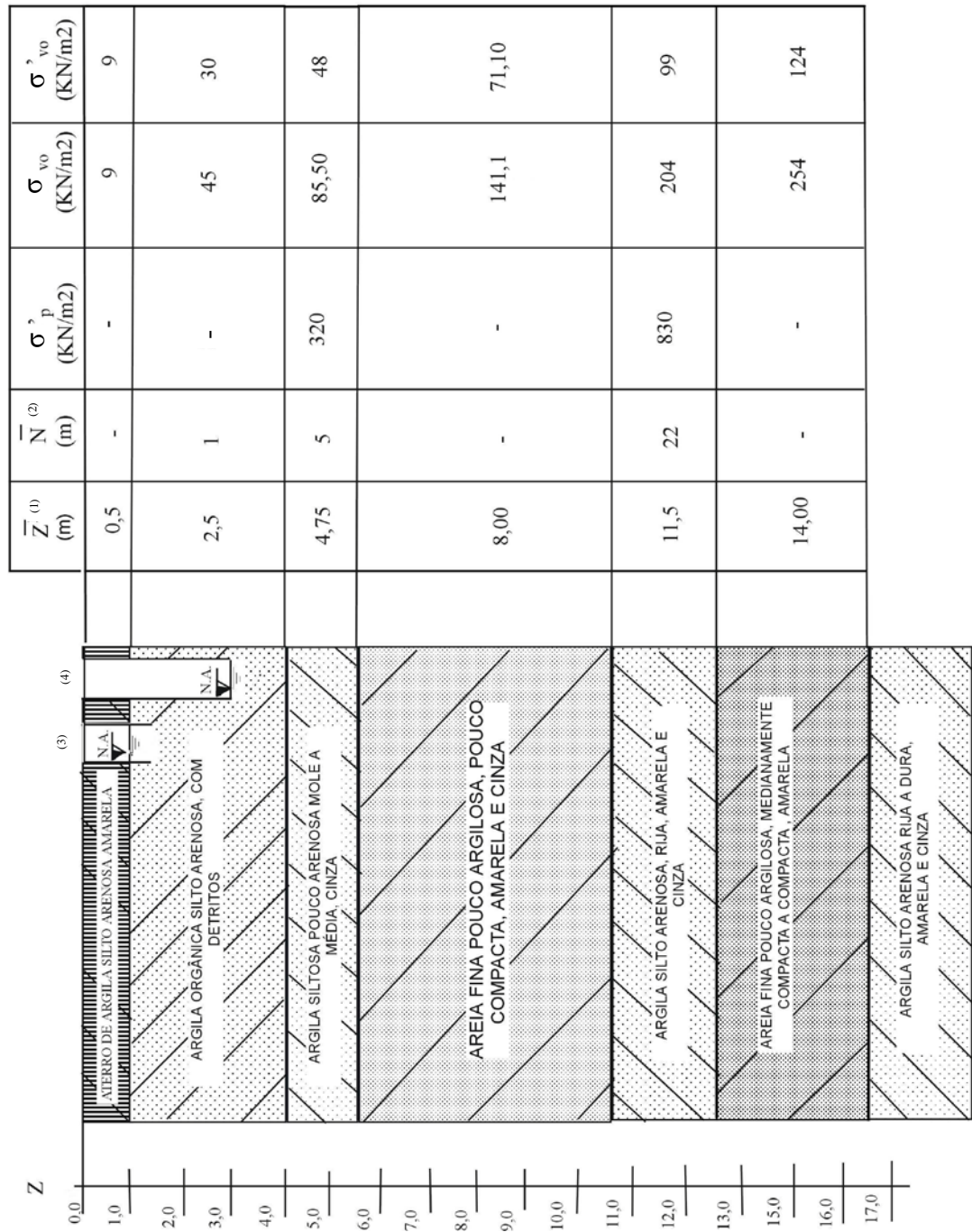


Figura IV.3 – Perfil característico da região em análise. Observar nível d’água histórico e atual.

- 1 Cota média de cada camada
2. SPT médio de cada camada
3. N. A. Inicial
4. N.A. Rebaixado

IV.3. EVOLUÇÕES TEÓRICAS DE RECALQUES

IV.3.1. Caso 1 – Carregamento introduzido pela construção de edifício alto

Quando da construção de um edifício alto, distinguem-se dois grandes eventos consecutivos que têm impacto sobre o carregamento das camadas do subsolo:

1. Escavação para construção das garagens;
2. Elevação do edifício.

Considera-se que a primeira fase representa um **alívio de esforços**, pelos trabalhos de escavação, enquanto que a segunda corresponde a um **carregamento gradual e lento**, que só é concluído quando da ocupação final do prédio.

Para o caso em estudo, considera-se típico da região um edifício residencial com as seguintes características:

- Terreno: 1.000 m²;
- Laje: 250 m²;
- Número de pavimentos-tipo: 16 (para coeficiente de aproveitamento igual a 4,0);
- Número de subsolos: 3;
- Carga total por pavimento: 12 kN/m².

Decorre que os esforços introduzidos sob o corpo do prédio serão consideravelmente maiores do que aqueles sob a periferia, conforme pode se observar da Figura IV.4, a seguir.

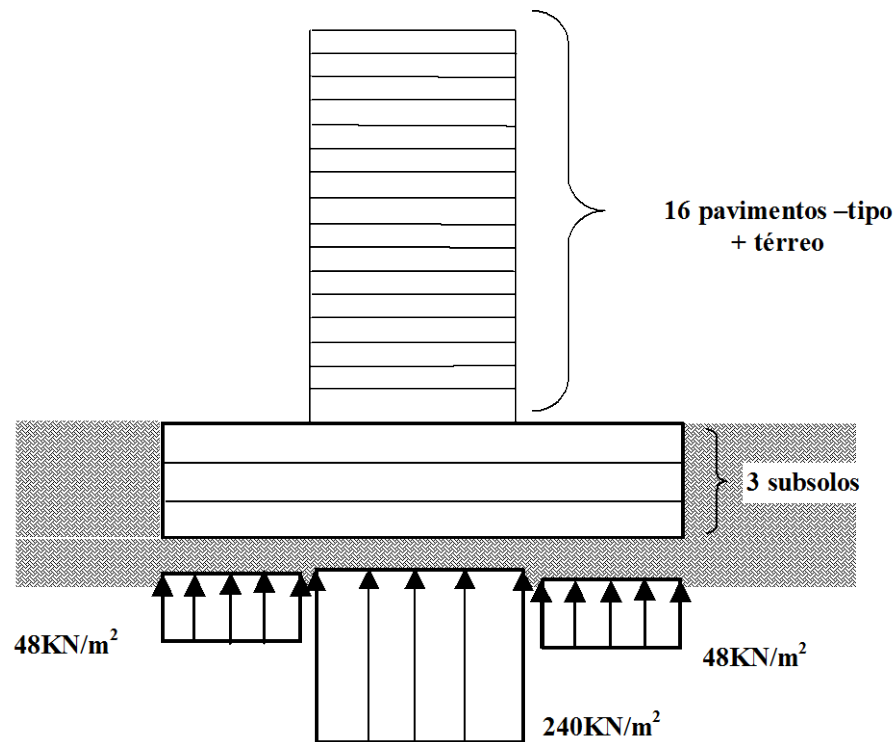


Figura IV.4 – Tensões introduzidas no maciço terroso por efeito da construção de um edifício alto.

Levando esses dados ao perfil de sondagem da Figura IV.3, impõem-se duas condições adicionais:

1. A construção dos dois subsolos implica em uma escavação de cerca de **8,5 m** de profundidade, o que implica em um alívio de tensões efetivas de 71,10 kN/m²;
2. A camada subjacente à escavação, de argila silto-arenosa rija situada entre as cotas 10,5 e 12,5 m de profundidade, é a que sofrerá mais efeitos de adensamento, visto que as demais camadas remanescentes ou são arenosas, e, portanto com recalques de ocorrência imediata, ou situadas acima da cota de apoio do edifício.

Nessa camada tem-se, portanto (V. Figura IV.3):

Tensão de sobre-adensamento:

$$\sigma'_p = 830 \text{ kN/m}^2$$

Tensão geostática inicial:

$$\sigma'_{vo} = 99 \text{ kN/m}^2 \quad (\ll \sigma'_p)$$

Alívio provocado pela escavação:

$$\Delta\sigma_e = -71,10 \text{ kN/m}^2$$

Tensão geostática após a escavação:

$$\sigma'_v = 99 - 71,10 = 17,90 \text{ kN/m}^2 \quad (\ll \sigma'_p)$$

Observa-se que, em um estado de tensões e outro, está-se em condição sobre-adensada, o que *induz a recalques por adensamento primário baixos*.

Introduzindo os esforços devidos à construção do edifício (V. Figura IV.4), tem-se:

Para a região sob o **corpo do prédio**:

$$\sigma'_{z,cp} = 240 \text{ kN/m}^2$$

Para a região sob a **periferia do prédio**:

$$\sigma'_{z,pp} = 48 \text{ kN/m}^2$$

Obtendo-se as seguintes tensões geostáticas após a construção do edifício:

Para a região sob o corpo do prédio:

$$\sigma'_{vcp} = \sigma'_v + \sigma'_{z,cp} = 17,90 + 240 = 257,90 \text{ kN/m}^2$$

Para a região sob a periferia do prédio:

$$\sigma'_{vpp} = \sigma'_v + \sigma'_{z,pp} = 17,90 + 48 = 65,90 \text{ kN/m}^2 < \sigma'_{vo}$$

Nota-se que:

1. Em ambos os casos, a tensão final é muito menor do que a tensão de sobre-adensamento, o que *induz a recalques por adensamento primário baixos*;
2. No caso da *periferia*, a tensão geostática final é menor do que a inicial, o que implica teoricamente *em recalques por adensamento primário pela construção do edifício desprezíveis nessa região dos edifícios*.

Conclui-se, portanto, que os efeitos de recalques por adensamento no entorno de edifícios altos como resultado dos esforços introduzidos por sua construção são *extremamente pequenos e limitados*, sendo que o seu efeito principal tende a ocorrer sob o *corpo dos edifícios*.

IV.3.2. Caso 2 – Esforços introduzidos pelo rebaixamento do nível freático

Conforme já exposto, o rebaixamento de lençol freático introduz *esforços equivalentes à pressão d'água removida no processo*, conforme a expressão (III.4), apresentada anteriormente.

Desta maneira, tendo em vista as evidências apresentadas na Tabela IV.2, o rebaixamento médio ocorrido na região foi de 2,0 m, o que implica em um sobrecarregamento do maciço de:

$$\Delta\sigma' = \gamma_a \cdot H_1 = 10 \times 2,0 = 20 \text{ kN/m}^2$$

Para as diversas camadas adensáveis no perfil da Figura IV.3, tem-se:

a) Camada de argila silto-arenosa rijas entre as cotas 10,5 e 12,5 m de profundidade:

Tensão de sobre-adensamento:

$$\sigma'_p = 830 \text{ kN/m}^2$$

Tensão geostática inicial:

$$\sigma'_{vo} = 99 \text{ kN/m}^2 \quad (\ll \sigma'_p)$$

Acréscimo provocado pelo rebaixamento:

$$\Delta\sigma' = 20 \text{ kN/m}^2$$

Tensão geostática após o rebaixamento:

$$\sigma'_v = 99 + 20 = 119 \text{ kN/m}^2 \quad (\ll \sigma'_p)$$

Observa-se que, em um estado de tensões e outro, está-se em condição sobre-adensada, o que *induz a recalques por adensamento primário baixos*.

b) Camada de argila siltosa pouco arenosa mole a média entre as cotas 4,0 e 5,5 m de profundidade:

Tensão de sobre-adensamento:

$$\sigma'_p = 320 \text{ kN/m}^2$$

Tensão geostática inicial:

$$\sigma'_{vo} = 48 \text{ kN/m}^2 \quad (\ll \sigma'_p)$$

Acréscimo provocado pelo rebaixamento:

$$\Delta\sigma' = 20 \text{ kN/m}^2$$

Tensão geostática após o rebaixamento:

$$\sigma'_v = 48 + 20 = 68 \text{ kN/m}^2 \quad (\ll \sigma'_p)$$

Observa-se que, em um estado de tensões e outro, está-se em condição sobre-adensada, o que *induz a recalques por adensamento primário baixos*, mesmo nesse caso em que a argila apresenta consistência de mole a média.

c) Camada de argila orgânica silto-arenosa com detritos entre as cotas 1,0 e 4,0 m de profundidade:

Tensão de sobre-adensamento: trata-se de argila normalmente adensada.

Tensão geostática inicial:

$$\sigma'_{vo} = 30 \text{ kN/m}^2$$

Acréscimo provocado pelo rebaixamento:

$$\Delta\sigma' = 20 \text{ kN/m}^2$$

Tensão geostática após o rebaixamento:

$$\sigma'_v = 30 + 20 = 50 \text{ kN/m}^2$$

Nesse caso, devem-se esperar *recalques por adensamento primário elevados e relativamente rápidos*, conforme discussão já apresentada no Item IV.2, item g, acima.

Conclui-se, portanto, que os recalques por adensamento devidos ao rebaixamento do lençol freático para o perfil em análise são *extremamente pequenos e limitados nas camadas de argila sedimentar terciária inferiores*, sendo, porém, elevados na camada de argila orgânica sobrejacente.

IV.3.3. Efeitos do adensamento secundário

Além do adensamento primário, devem ser levados em conta os efeitos do *adensamento secundário* que, como discutido no Item III.1 deste trabalho, são bastante lentos (“seculares”) e independentes da introdução de esforços adicionais ao maciço.

Embora não se disponham de elementos técnicos laboratoriais que permitam uma mensuração mais precisa de tais recalques (como aliás também faltam aos recalques por adensamento primário), é possível estimar-se a sua *magnitude* a partir de uma análise paramétrica, aplicando-se a expressão III.3 e os parâmetros indicados no texto:

$$S_s = C_\alpha \cdot H \cdot \log \frac{t_s}{t_p}$$

Para o caso das camadas de argilas sobre-adensadas, tem-se os seguintes **recalques máximos**:

a) Camada de argila silto-arenosa rija, sobre-adensada, entre as cotas 10,5 e 12,5 m de profundidade, estimam-se os seguintes **recalques máximos**:

$$H = 2,0 \text{ m}$$

$$C_\alpha = 0,001$$

$$t_s = 100 \text{ anos}$$

$$t_p = 10 \text{ a } 20 \text{ anos}$$

De onde decorre:

$$S_s = 2 \text{ a } 3 \text{ mm}$$

b) Camada de argila siltosa pouco arenosa mole a média, sobre-adensada, entre as cotas 4,0 e 5,5 m de profundidade, estimam-se os seguintes **recalques máximos**:

$$H = 1,0 \text{ m}$$

$$C_\alpha = 0,001$$

$$t_s = 100 \text{ anos}$$

$$t_p = 10 \text{ a } 20 \text{ anos}$$

De onde decorre:

$$S_s = \text{cerca de } 1 \text{ mm}$$

c) Para a camada de argila orgânica silto-arenosa com detritos (*turfa*) entre as cotas 1,0 e 4,0 m de profundidade, normalmente adensada, tem-se a seguinte faixa de variação de **recalques mínimos secundários**:

$$H = 3,0 \text{ m}$$

$$C_\alpha = 0,08$$

$$t_s = 100 \text{ anos}$$

$$t_p = 2 \text{ a } 5 \text{ anos}$$

De onde decorre:

$$S_s = \text{312 a } 408 \text{ mm}$$

Conclui-se, portanto, que os efeitos de recalques por adensamento secundário são *preponderantes e extremamente elevados* na camada de argila orgânica, enquanto que nas camadas de argila sedimentar terciária inferiores são *extremamente pequenos e limitados*, ocorrendo independentemente de qualquer sobrecarga adicional.

V. CONCLUSÕES

1. A análise documental realizada indica, pela conformação topográfica da região e por indicações de elementos técnicos antigos, a existência de uma várzea no entorno de antigo afluente do córrego Uberabinha. Tal curso d'água seria já inexistente na década de 1930, quando a urbanização da região já se processava, e sua diretriz cruzaria as atuais avenidas Ibirapuera, Jamaris e Divino Salvador. Perfis de sondagem realizados posteriormente indicam a ocorrência de depósitos de argila orgânica nessas imediações, o que tende a confirmar essa hipótese.
2. Essa camada orgânica superficial tem comportamento normalmente adensado, sendo que o subsolo, tipicamente, apresenta camadas de argila sedimentar

terciária sobre-adensadas, entremeadas por camadas arenosas, o que facilita a drenagem intersticial do conjunto.

3. A característica sobre-adensada das camadas inferiores tende a conduzir a recalques por adensamento primário baixos, mesmo quando da construção de edifícios altos. Em especial, tais recalques tendem a ser maiores sob os “corpos” dos prédios, onde se concentram as maiores tensões, e praticamente incipientes sob as suas “periferias”, onde a escavação para a construção de garagens subterrâneas acaba por provocar alívio no maciço terroso, com a introdução posterior de esforços inferiores aos inicialmente existentes.
4. Tal fato ocorre também quando do rebaixamento de nível freático nas camadas argilosas inferiores, ao contrário do que ocorre na camada sobrejacente de argila orgânica, de comportamento normalmente adensado e com expectativa de ocorrência de recalques por adensamento primário elevados.
5. Os recalques por adensamento secundários (que ocorrem independentemente de qualquer alteração do estado de tensões do maciço, mas que somente acontecem após o surgimento de um fenômeno de adensamento primário) apresentam ordem de grandeza muito pequena para as camadas inferiores sobre-adensadas, e extremamente acentuadas para a camada de argila orgânica superficial, a qual já deve sofrer adensamento primário expressivo pelo rebaixamento no nível freático. Tal condição indica a expectativa de danos contínuos nos elementos construtivos que tenham fundações superficiais, como já se começa a fazer sentir pelas ocorrências constatadas no entorno da Avenida dos Jamaris.

BIBLIOGRAFIA

Sousa Pinto, Carlos de - “Propriedades dos Solos”, in Fundações Teoria e Prática, São Paulo, Ed. Pini, 1998.

Teixeira, Alberto Henriques e Godoy, Nelson Silveira de - “Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas, in Fundações Teoria e Prática, São Paulo, Ed. Pini, 1998.

Vargas, Milton – “Introdução à Mecânica dos Solos”, Porto Alegre, Editora da Universidade de São Paulo, 1977.

ANEXO – IMAGENS AÉREAS