

# CONSOLIDAÇÃO DO SUB-SOLO DO PALÁCIO DO CATETE (MUSEU DA REPUBLICA)

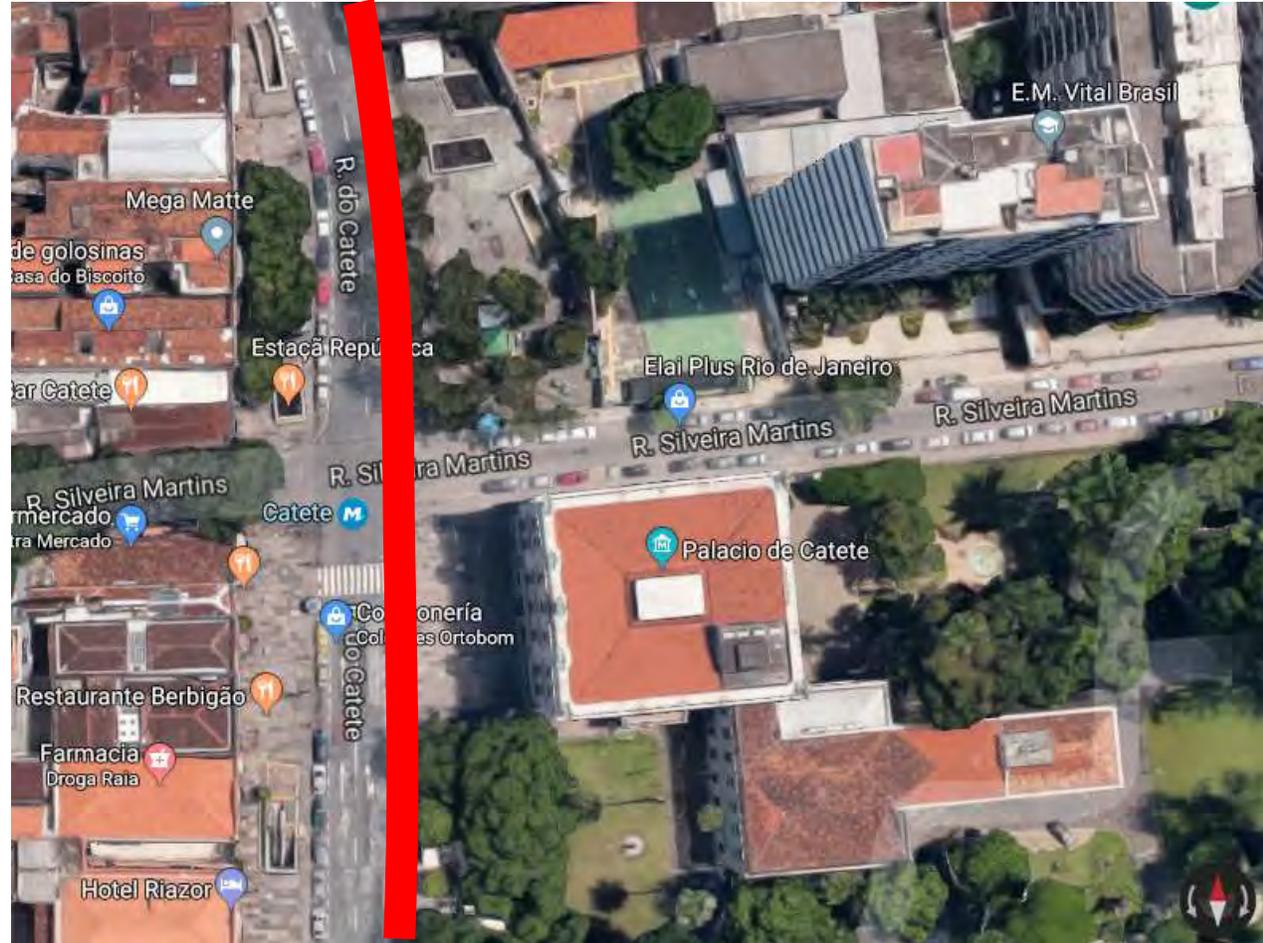
**Palestra preparada pelo Eng. Erland  
Gonzalez Leano, baseada no relatório  
de Consultoria do Prof. Pedricto Rocha  
Filho.**

# 1. INTRODUÇÃO

- Durante o período da construção da escavação (iniciado em 1976). O Palácio sofreu recalques de ordem de 30mm e 5mm, respectivamente, na frente e fundos.
- Em 1977 com a conclusão da galeria, a velocidade de deformação diminuiu chegando inclusive a se estabilizar no período de 1978 a 1979.
- Em 1983, foram verificadas novas aberturas nas fissuras já existentes, e medições adicionais indicaram uma velocidade média de recalque da ordem de 5micra/dia.
- Análises procedidas sobre a reativação dos movimentos, levaram a concluir que as micro solicitações cíclicas geradas pelo tráfego (veículos e trens) podem ser evocadas como causadoras de tais efeitos.
- Para a construção do metrô, foi executada uma parede tipo diafragma moldada no solo através de trincheiras estabilizadas com lama bentonítica.
- Essa parede foi projetada para suportar solicitações oriundas da fase construtiva (terreno arrimado, maquinaria, prédios vizinhos, etc.) e, devido à sua incorporação definitiva, àquelas surgidas durante a operação da linha.

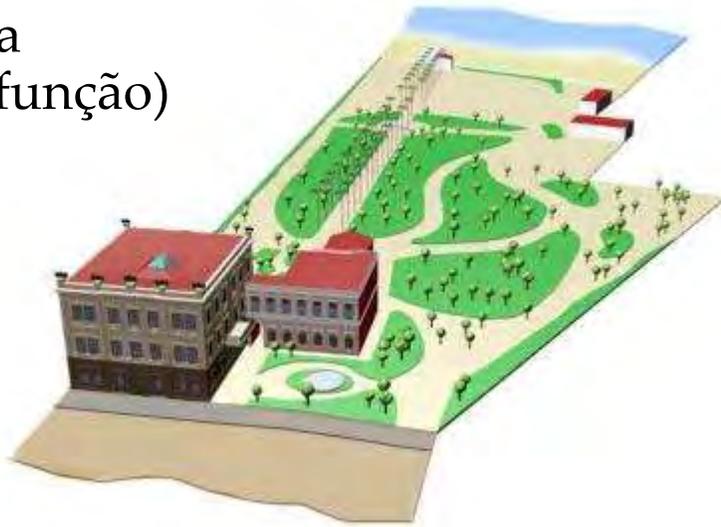
## 2. LOCALIZAÇÃO

- Entre Rua do Catete e Rua Silveira Martins

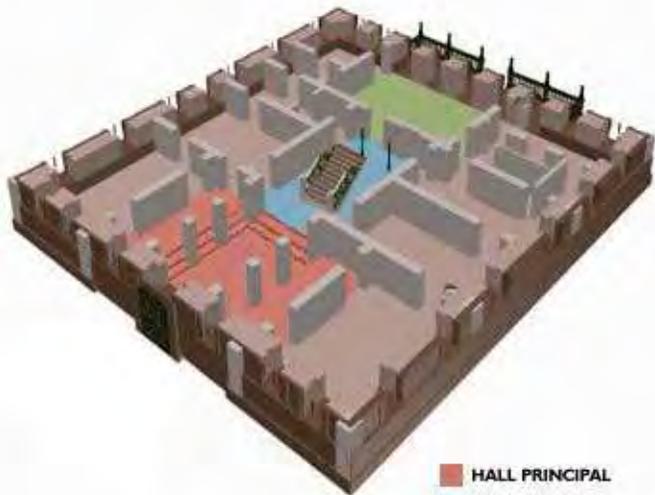


## 2. LOCALIZAÇÃO

- Arquitetura (Estética e função)



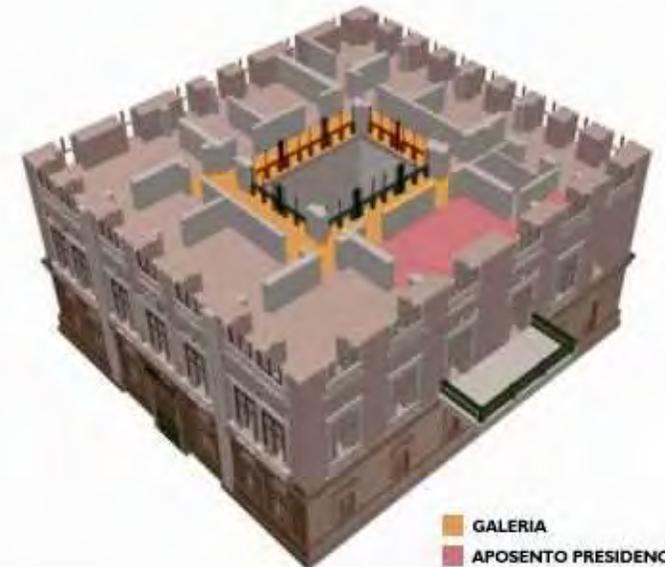
- 1º PAVIMENTO
- 2º PAVIMENTO
- 3º PAVIMENTO
- ESPAÇO CENTRAL



- HALL PRINCIPAL
- HALL ESCADA
- SALÃO MINISTERIAL



- CAPELA
- SALÃO AZUL
- SALÃO NOBRE
- SALÃO POMPEANO



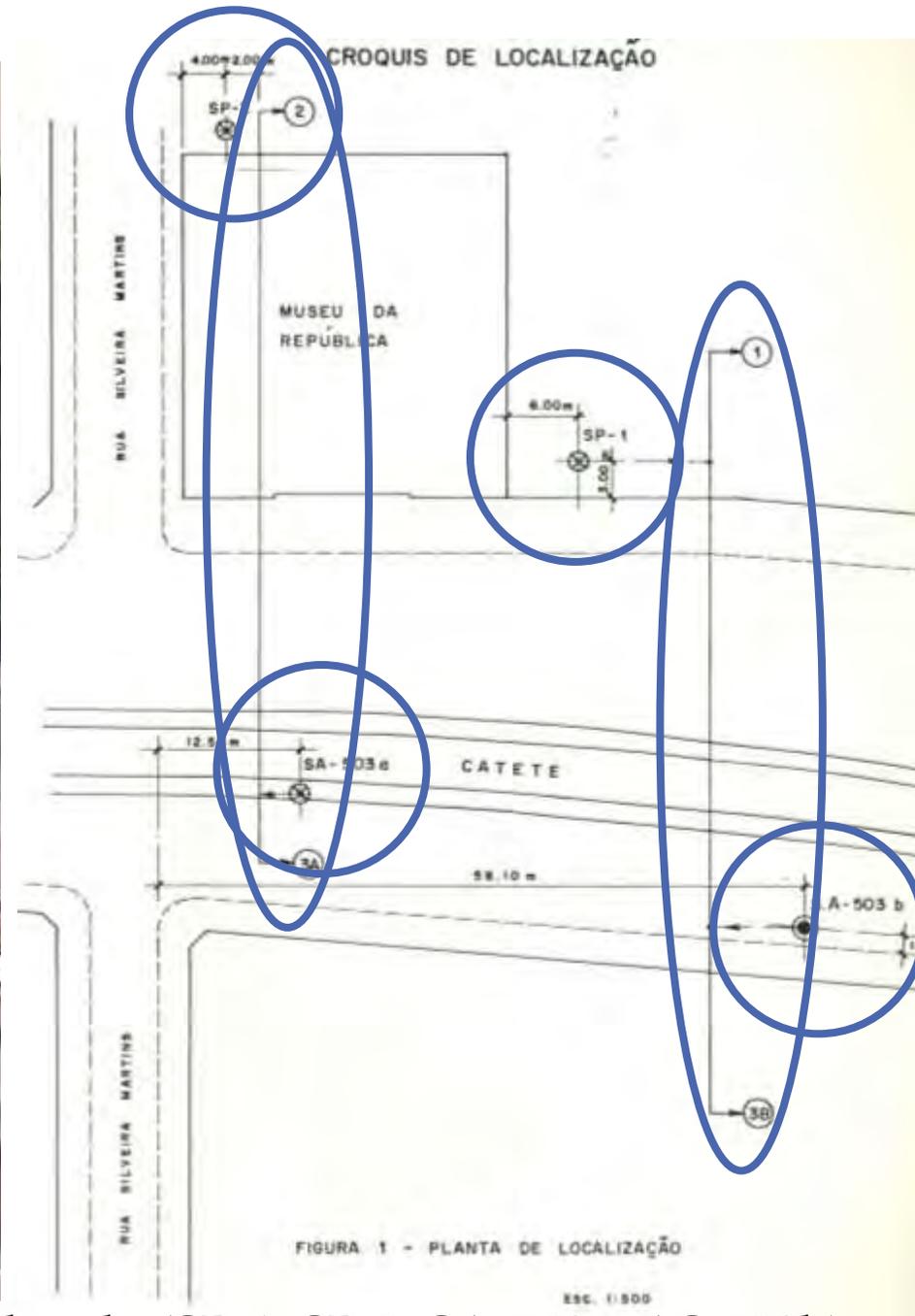
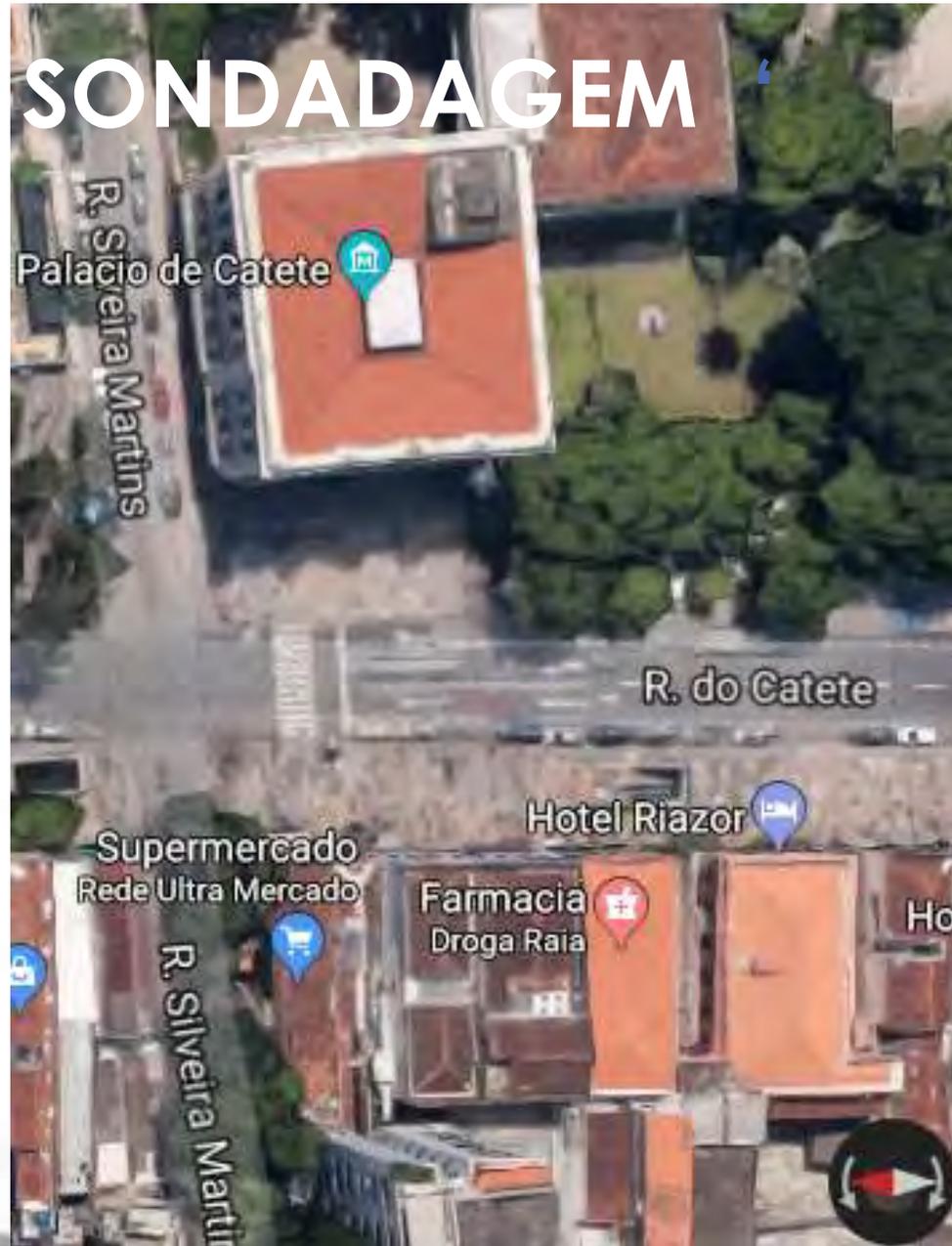
- SALÃO VENEZIANO
- SALÃO MOURISCO
- SALÃO DOS BANQUETES

- GALERIA
- APOSENTO PRESIDENCIAL

### 3. CONSTRUÇÃO DA ESTAÇÃO CATETE

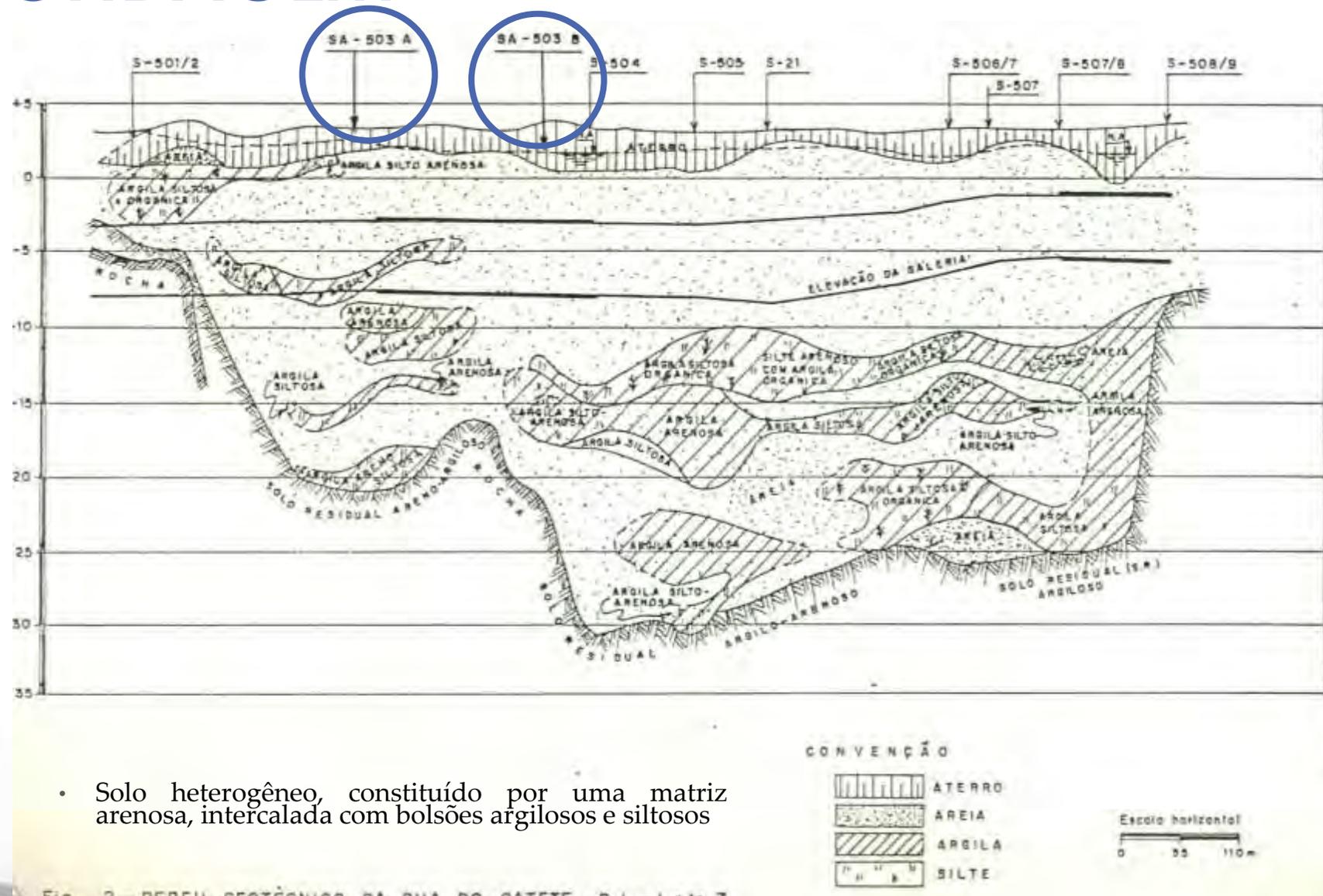
- Durante a fase de execução, a parede seria apoiada por estroncas implantadas assim que a profundidade da escavação permitisse. Os esforços oriundos da parede seriam transferidos às vigas metálicas longitudinais, apoiadas em estroncas espaçadas a cada 2 m; estas, contra ventadas a meio vão por cantoneiras.
- Durante a fase de operação da galeria, a estrutura consistiria, basicamente da parede diafragma incorporada, lajes de fundo e teto interligadas por pilares centrais e reaterro sobre a laje do teto, até o nível da rua.
- O primeiro metro superficial do sub-solo (aterro) seria contido por perfis metálicos embutidos na parede diafragma, espaçados a cada 2,0 m e preenchidas por pranchões de madeira.
- Com a retirada das estroncas, a parede seria apoiada pelas lajes e por apoios que se desenvolveram no reaterro compactado (acirra da laje do teto) e no solo situado abaixo da laje de fundo.

## 4. SONDADAGEM



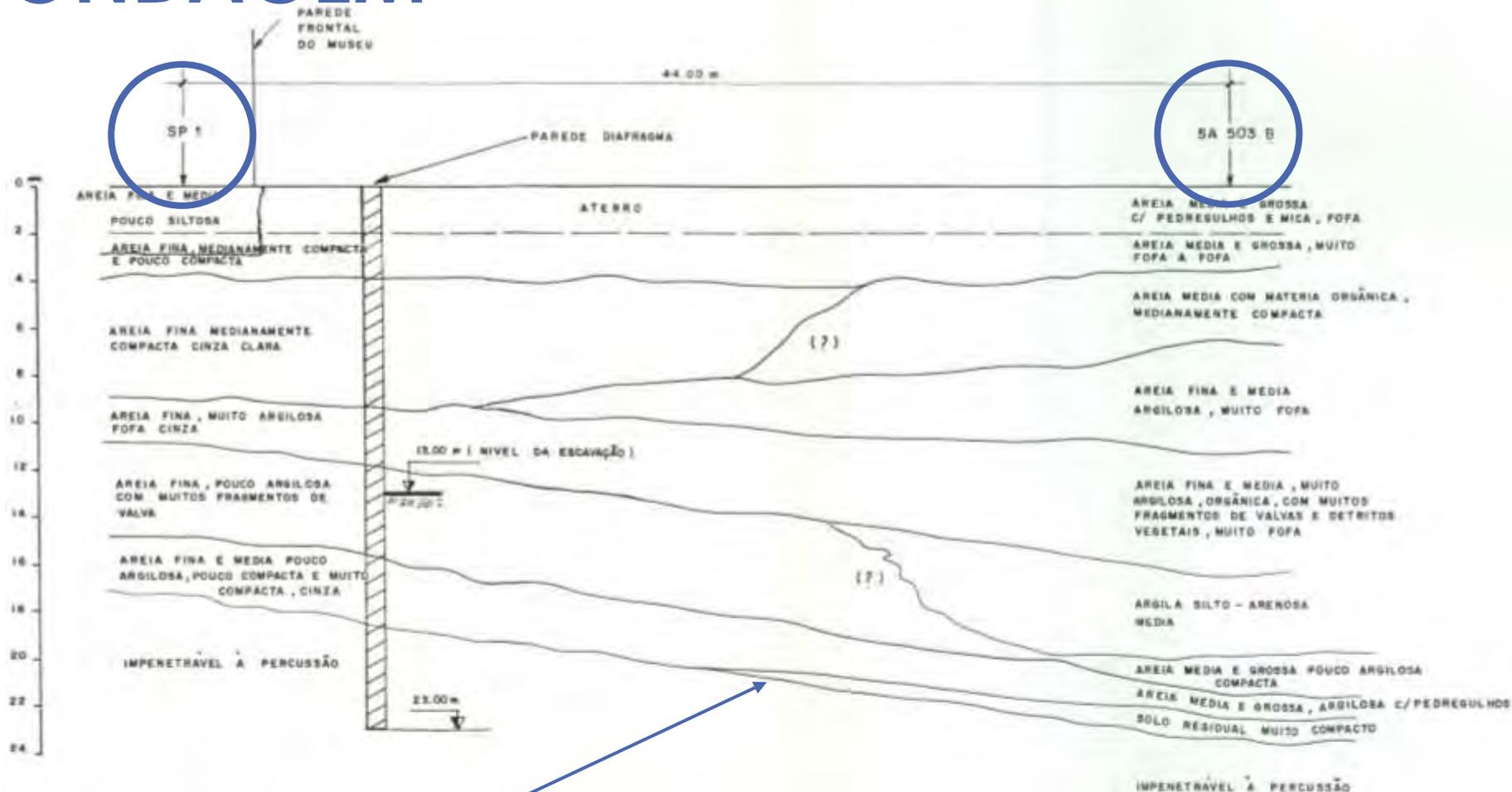
- Quatro sondagens de investigação do sub-solo (SP-1, SP-2, SA-503a, AS-503b).

# 4. SONDAGEM



- Solo heterogêneo, constituído por uma matriz arenosa, intercalada com bolsões argilosos e siltosos

# 4. SONDAGEM



- Declividade da camada resistente à percussão no sentido no fundo para frente do Museu.

FIGURA 4 - PERFIL GEOTÉCNICO - SEÇÃO 1 - 3B (VER FIGURA 1)

- Perfil interpolado (aparentemente impreciso) pelas sondagens SP-1/ AS-503B.

# 4. SONDAGEM

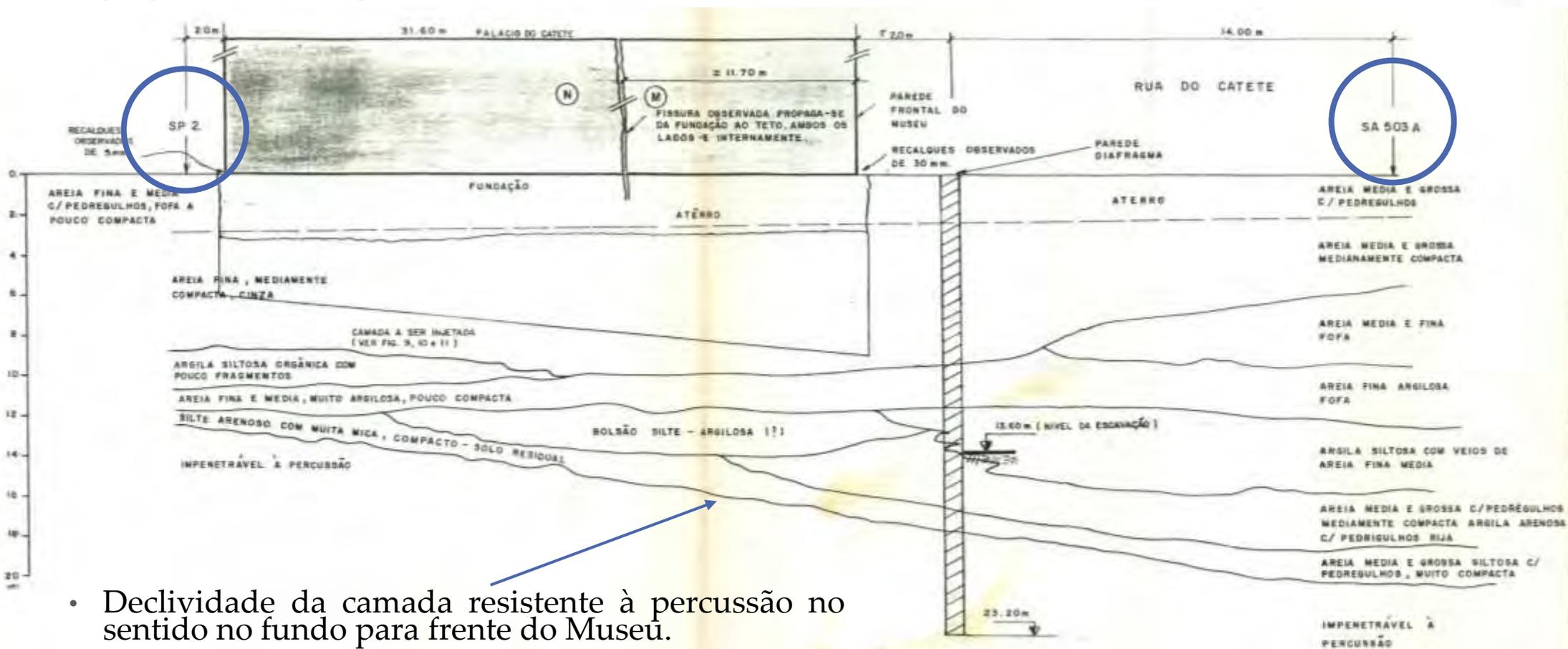


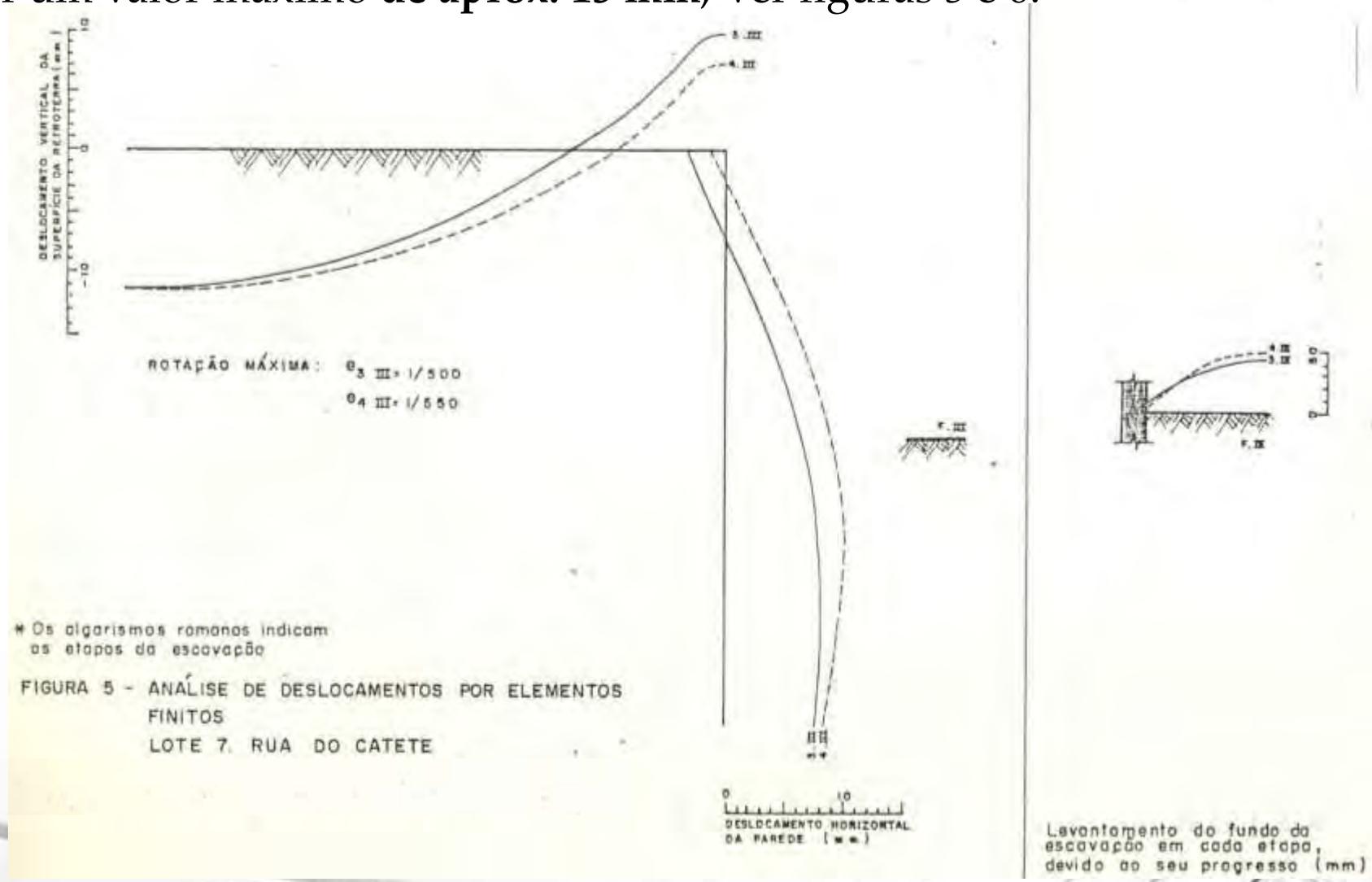
FIGURA 3 - PERFIL GEOTÉCNICO - SEÇÃO 2 - 3A (VER FIGURA 1)

- Declividade da camada resistente à percussão no sentido no fundo para frente do Museu.

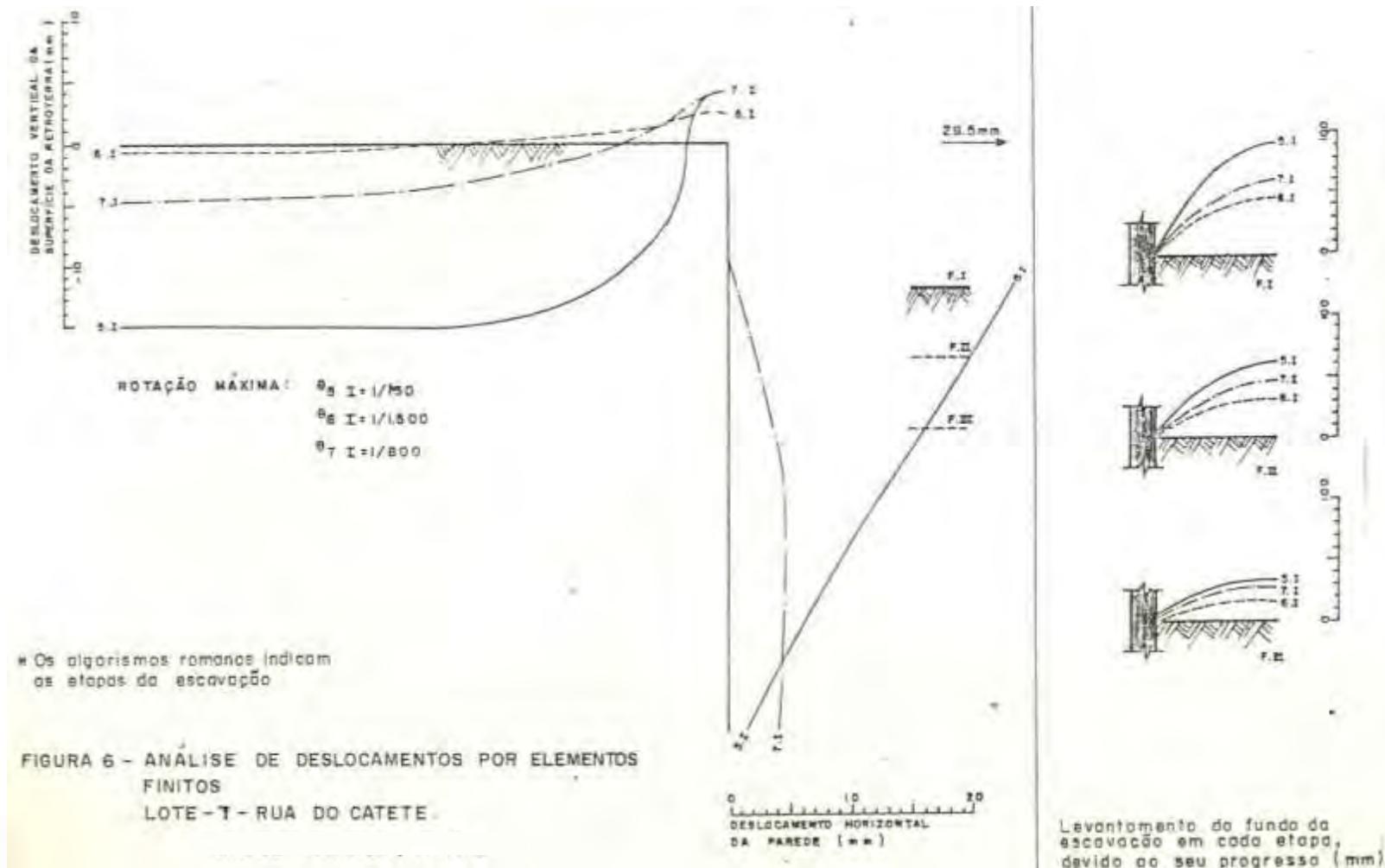
- Perfil interpolado (aparentemente impreciso) pelas sondagens SP-2/SA-503A.

# 5. ANÁLISES

- Mostrou-se que deformações elásticas verticais na superfície da retroterra, podem atingir um valor máximo de **aprox. 15 mm**, Ver figuras 5 e 6.



# 5. ANÁLISES

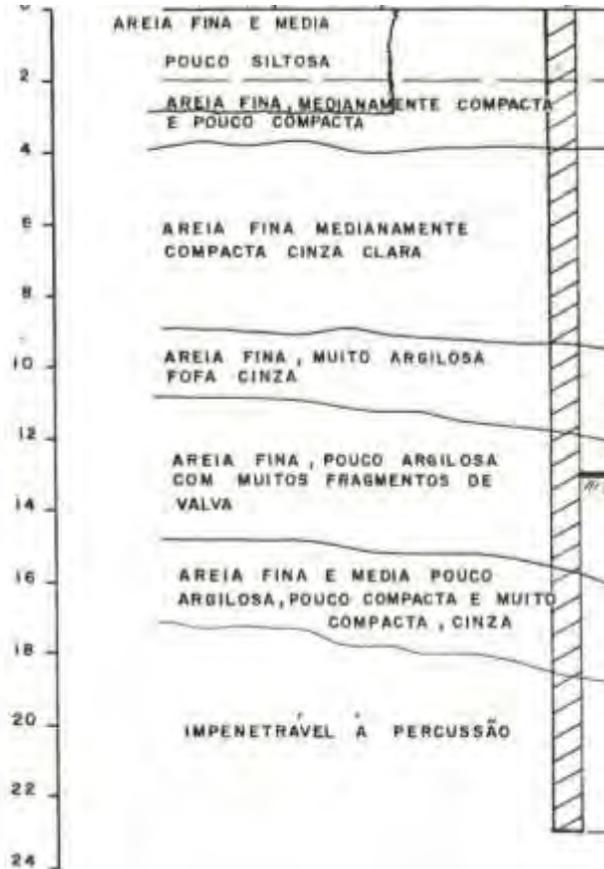


- (Relatório dos Poços para Prospecção das Fundações do Museu da República) Poço 01 - "A rachadura que corre toda a fachada do prédio, prolonga-se até às partes profundas da fundação e observa-se no próprio solo".

## 5. ANÁLISES

- As deformações ocorridas nas paredes dos fundos estão dentro de possíveis valores impostos à retroterra, considerando um regime elástico de deformação.
- Essa mesma afirmativa não pode ser feita aos deslocamentos sofridos pela fundação da parede frontal, ou seja, os **30 mm** observados do valor de recalque podem ser considerados excessivos para um regime elástico da deformação, conseqüentemente é possível que neste valor estejam também embutidos componentes de origem plástico, decorrentes da formação de superfícies de ruptura dentro da zona de influência da respectiva fundação.
- Foi observado que os valores excessivos registrados na parte posterior não diminuem de forma gradativa na direção dos fundos do prédio, conforme se esperaria de um modelo no regime elástico de deformações.

# 6. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS-GEOTÉCNICAS DO SUB-SOLO



Tipo de solo	Profundidade [m]	Nspt [golpes]	Dr [%]	Su [kg/cm <sup>2</sup> ]
Areia densa	0 – 2	12 a 14	65 a 85	-
Areia fofa ou medianamente comp.	2 – 9	8	25 a 35 35 a 65	-
Argila siltosa orgânica	-	2 a 3	-	0,34 a 0,42

Tipo de solo	$\phi'$	$C'$	$E'$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]
Areia fina e média, fofa	27	0	200
Areia medianamente compacta	30	0	300
Areia densa	43	0	350

- $\phi'$  e  $C'$  são os parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento e  $E'$  é o Módulo de Young, obtido (Rocha Filho-1979).

# 7. ANÁLISES DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES

- A análise será feita considerando, principalmente, a parede frontal do Museu da República



- Peso da Parede
- Altura = 21,0 m
- Largura = 1,10 m
- Comprimento = unitário
- Peso específico do material = 1,8tf/m<sup>3</sup>

# 7.1. TENSÕES EXISTENTES – DEVIDO AO PESO DO PRÉDIO E DO SOLO

- A análise será feita considerando, principalmente, a parede frontal do Museu da República

- **Peso do Bloco de Fundação**

- Dimensão =  $(3,0 + 2,0) \times 1,5\text{m}$

- Peso específico do material =  $2,3\text{tf/m}^3$

- $$\sigma_v(3 \times 1) = \frac{21 \cdot 1,10 \cdot 1,8}{3} + \frac{(3,0 + 2,0) \cdot 1,5 \cdot 2,3}{3}$$

- $$\sigma_v = 13,86 + 5,75 = 19,6 \text{ tf/m}^2$$

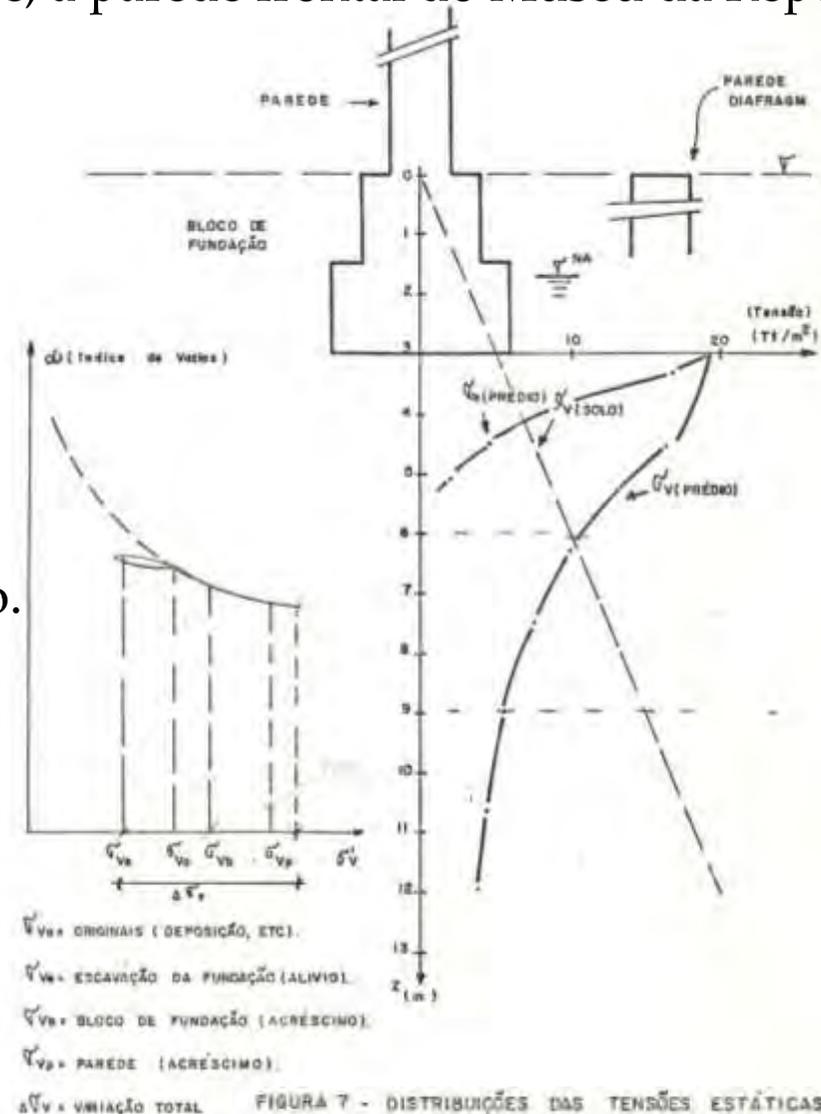
- Obs.: 70% peso da parede e 30% peso do bloco.

- **Peso do Solo removido**

- Peso específico da areia seca =  $1,7 \text{ tf/m}^3$

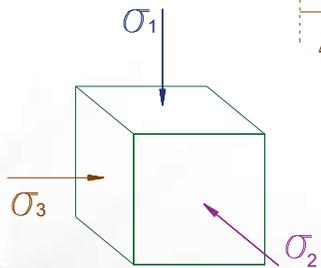
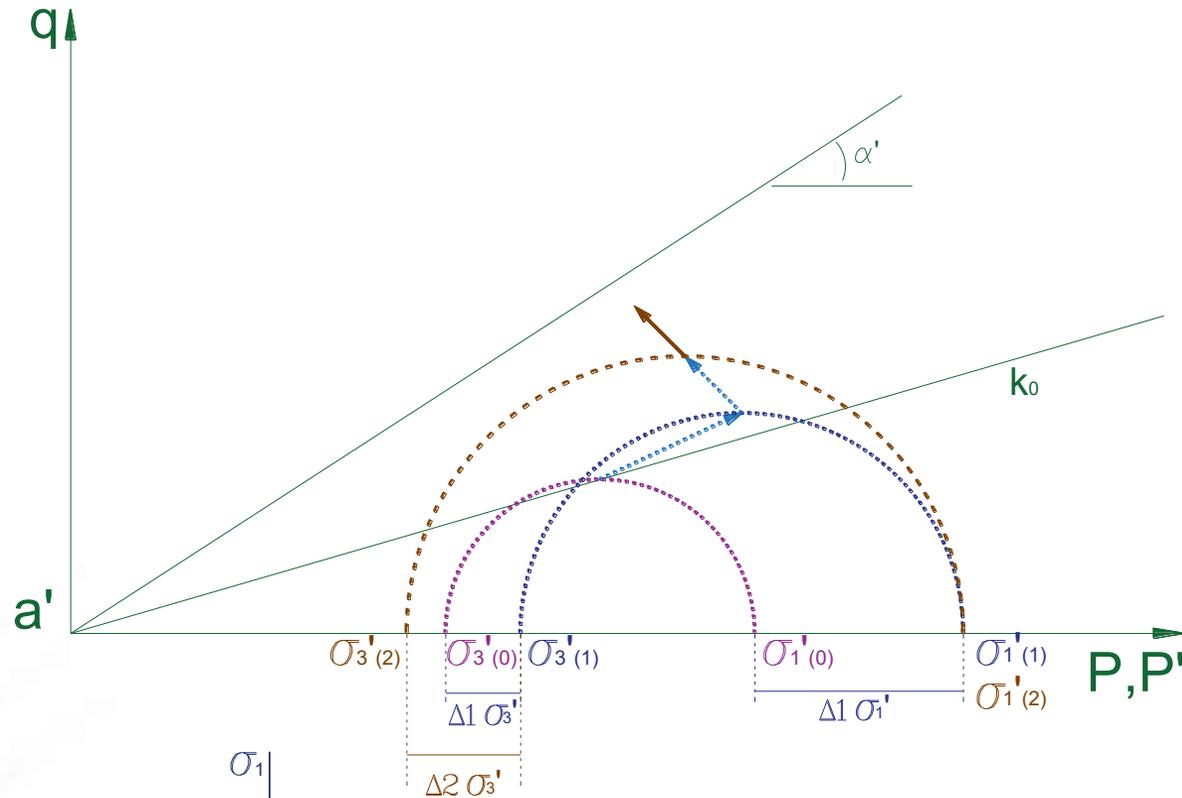
- $$\sigma_v(3 \times 1) = \frac{3 \cdot 3 \cdot 1,7}{3}$$

- $$\sigma_v = 5,1 \text{ tf/m}^2$$



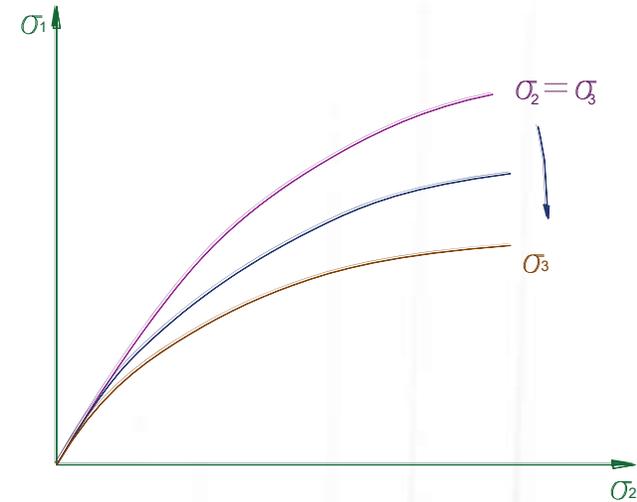
# 7.1. TENSÕES EXISTENTES – DEVIDO AO PESO DO PRÉDIO E DO SOLO

- Trajetória de tensões

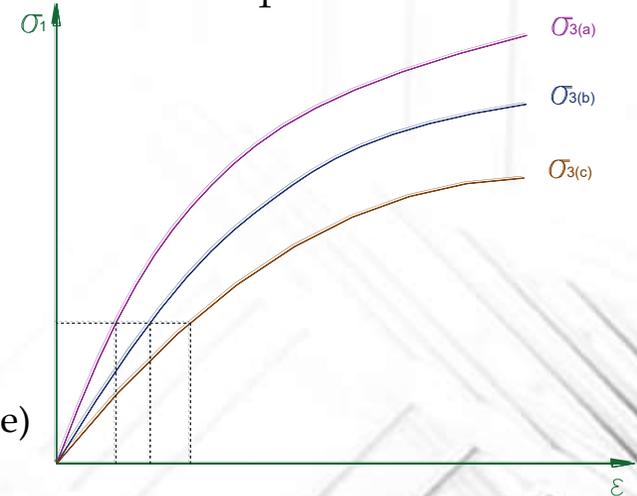


- $\sigma_1$  tensão vertical
- $\sigma_2$  tensão horizontal (paralelo à parede)
- $\sigma_3$  tensão horizontal (perpendicular à parede)

- Curva  $\sigma_1$  vs  $\sigma_2$



- Curva  $\sigma_1$  vs  $\varepsilon$



# 7.2. TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO ÀS SOLICITAÇÕES DINÂMICAS

- Verificou-se que:
  - a) Os níveis dos sinais observados na estrutura do Edifício, estão dentro da faixa de sensibilidade do equipamento.
  - b) Os valores de vibrações medidas no solo (próximo a fundação) são maiores do que os medidos na estrutura do Edifício.
- Foi feita uma análise paramétrica para a influência das solicitações dinâmicas, considerando que a parede diafragma da galeria estivesse vibrando com a intensidade dos valores máximos observados pela instrumentação.
- Na análise dos acréscimos de tensão devido as solicitações dinâmicas, adotou-se o modelo proposto por Mononobe e Matsuo, 1929. Neste modelo, considera-se que as forças inerciais atuam na cunha, tanto vertical como horizontalmente.

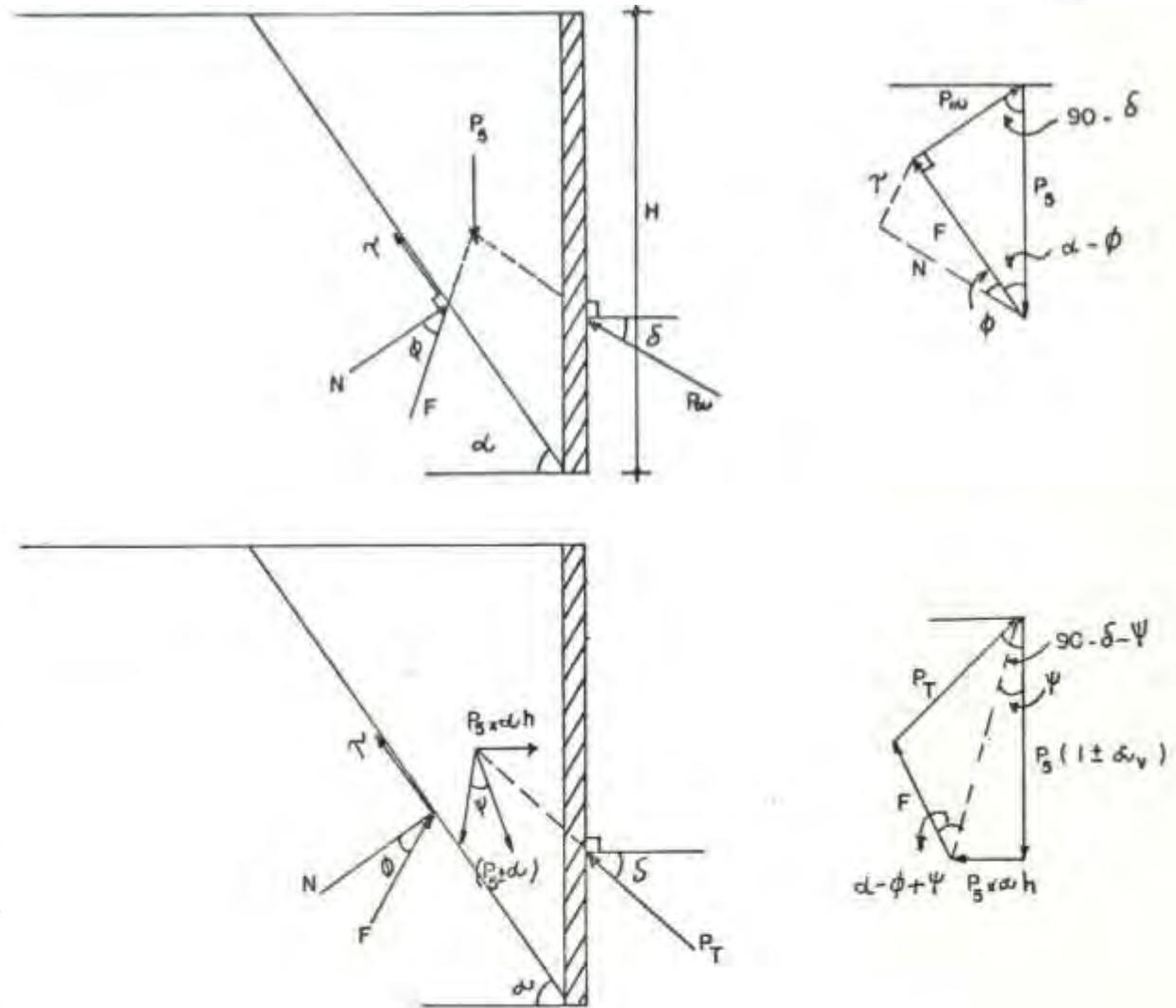


FIGURA 8 : MODELO ADOTADO PARA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS SOLICITAÇÕES DINÂMICAS.

## 7.2. TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO ÀS SOLICITAÇÕES DINÂMICAS

- No caso estático (teoria clássica de Mecânica de Solos), o empuxo será :

para simplificação adotou-se  $\alpha = 45 + \phi/2$

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\cos^2 \phi}{\cos \delta} \cdot \frac{1}{\left\{ 1 + \left[ \frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin \phi}{\cos \delta} \right]^{1/2} \right\}^2}$$

- Solicitações dinâmicas.

$$P_t = P_a + P_{din} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\cos^2(\phi - \psi)(1 \pm a_v)}{\cos(\psi) \cdot \cos(\delta + \psi)} \cdot \frac{1}{\left\{ 1 + \left[ \frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi + \psi)}{\cos(\delta + \psi)} \right]^{1/2} \right\}^2}$$

$$\alpha_h = \frac{a_h}{g} \text{ (coeficiente horizontal dinâmico)} \qquad \alpha_v = \frac{a_v}{g} \text{ (coeficiente vertical dinâmico)}$$

$$\psi = \arctan \left( \frac{\alpha_h}{1 \pm \alpha_v} \right)$$

## 7.2. TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO ÀS SOLICITAÇÕES DINÂMICAS

- Para se obter os acréscimos relativos devido as solicitações dinâmicas, pode-se utilizar a seguinte relação:

$$\frac{P_t = P_a + P_{din}}{P_a} = \frac{\cos^2(\phi - \psi)(1 \pm a_v)}{\cos(\psi) \cdot \cos(\delta + \psi)} \cdot \frac{1}{\left\{1 + \left[\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi + \psi)}{\cos(\delta + \psi)}\right]^{1/2}\right\}^2}$$

- As tabelas, em anexo, fornecem os resultados desta expressão considerando os seguintes valores:
- $\phi = 15; 20; 25; 30; 35$  – ângulo de atrito efetivo de resistência ao cisalhamento.
- $\delta = 0; 5; 10; 15; 20$  – ângulo de atrito parede-solo.
- $\alpha_h = 0,005; 0,01; 0,02; 0,03; 0,05; 0,10$  – coeficiente horizontal dinâmico.
- $\alpha_v = 1/2 \cdot \alpha_h$  e  $\alpha_v = \alpha_h$  coeficiente vertical dinâmico.
- Obs. No caso de:

+ $a_v$  (movimento vertical descendente)

- $a_v$  (movimento vertical ascendente)

## 7.2. TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO ÀS SOLICITAÇÕES DINÂMICAS

- Os valores medidos pela instrumentação foram:

$$V_{max} = 0,37mm/s \text{ (velocidade máxima)}$$

$$f \approx 37Hz \text{ (frequência máxima)}$$

- Então:

$$a_h = V \cdot 2\pi \cdot f = 0,37 \cdot 2\pi \cdot 37 = 86mm/s^2$$

$$\alpha_h = \frac{a_h}{g} = \frac{86}{9810} = 0,008$$

- Conforme observa-se dos resultados, mesmo considerando os valores correspondentes a  $\alpha_h = 0,01$ , o acréscimo no empuxo devido às solicitações dinâmicas ficam, no máximo, em tomo de 3%. Analogamente, pode-se esperar que os acréscimos de tensões são, também, da mesma magnitude.

# 7.2. TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO ÀS SOLICITAÇÕES DINÂMICAS

TABELA 1 - VALORES DE  $Pt(P_{\alpha\alpha} + P_{din})/P_{\alpha\alpha}$   
 QUANTIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS SOLICITAÇÕES DINÂMICAS

$\alpha h = 0,005$

$\theta \setminus f$	0	5	10	15	20
15	1,01	1,01	1,01	1,21	1,01
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
20	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
25	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
35	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
15	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
20	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
25	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
30	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
35	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02

$\psi = 0,23$   
 $\alpha_v = \alpha_h$

$\alpha h = 0,02$

$\theta \setminus f$	0	5	10	15	20
15	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06
	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02
20	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06
	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02
25	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06
	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02
30	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
35	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05

$\psi = 1,12$   
 $\alpha_v = \alpha_h$

$\alpha h = 0,05$

$\theta \setminus f$	0	5	10	15	20
15	1,12	1,12	1,14	1,14	1,15
	1,01	1,02	1,03	1,03	1,03
20	1,13	1,13	1,14	1,14	1,15
	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04
25	1,13	1,14	1,14	1,15	1,15
	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04
30	1,14	1,15	1,15	1,15	1,16
	1,03	1,04	1,04	1,04	1,05
35	1,15	1,15	1,16	1,16	1,17
	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06
15	1,13	1,14	1,13	1,15	1,16
	1,02	1,03	1,04	1,14	1,05
20	1,13	1,14	1,15	1,15	1,16
	1,02	1,03	1,04	1,04	1,05
25	1,14	1,15	1,15	1,16	1,16
	1,03	1,04	1,04	1,05	1,05
30	1,15	1,16	1,16	1,17	1,17
	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06
35	1,16	1,17	1,17	1,17	1,18
	1,05	1,05	1,05	1,06	1,07

$\psi = 2,73$   
 $\alpha_v = \alpha_h$

$\alpha h = 0,01$

$\theta \setminus f$	0	5	10	15	20
15	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
20	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01
25	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
30	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02
35	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
15	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,02	1,02	1,01	1,01	1,01
20	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,02	1,02	1,01	1,01	1,01
25	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
30	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
35	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01

$\psi = 0,28$   
 $\alpha_v = \alpha_h$

$\alpha h = 0,01$

$\theta \setminus f$	0	5	10	15	20
15	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
20	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01
25	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
30	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
35	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
15	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
20	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01
25	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
30	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
35	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01

$\psi = 0,57$   
 $\alpha_v = \alpha_h$

$\alpha h = 0,10$

$\theta \setminus f$	0	5	10	15	20
15	1,25	1,27	1,27	1,27	1,27
	1,02	1,04	1,04	1,04	1,04
20	1,26	1,27	1,28	1,28	1,28
	1,03	1,04	1,06	1,06	1,07
25	1,27	1,28	1,28	1,31	1,32
	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08
30	1,28	1,30	1,31	1,32	1,33
	1,05	1,06	1,07	1,08	1,08
35	1,31	1,32	1,33	1,33	1,34
	1,07	1,08	1,09	1,09	1,10
15	1,25	1,27	1,27	1,27	1,27
	1,06	1,07	1,10	1,11	1,11
20	1,30	1,32	1,34	1,35	1,37
	1,06	1,06	1,10	1,10	1,12
25	1,31	1,33	1,34	1,36	1,37
	1,07	1,08	1,10	1,12	1,12
30	1,33	1,35	1,36	1,37	1,38
	1,09	1,10	1,11	1,12	1,14
35	1,36	1,37	1,38	1,39	1,40
	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15

$\psi = 5,15$   
 $\alpha_v = \alpha_h$

$\alpha h = 0,01$

$\theta \setminus f$	0	5	10	15	20
15	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
20	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
25	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
30	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
35	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
15	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09
	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03
20	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09
	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03
25	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09
	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03
30	1,09	1,09	1,09	1,09	1,10
	1,03	1,03	1,03	1,03	1,04
35	1,09	1,10	1,10	1,10	1,10
	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04

$\psi = 0,58$   
 $\alpha_v = \alpha_h$

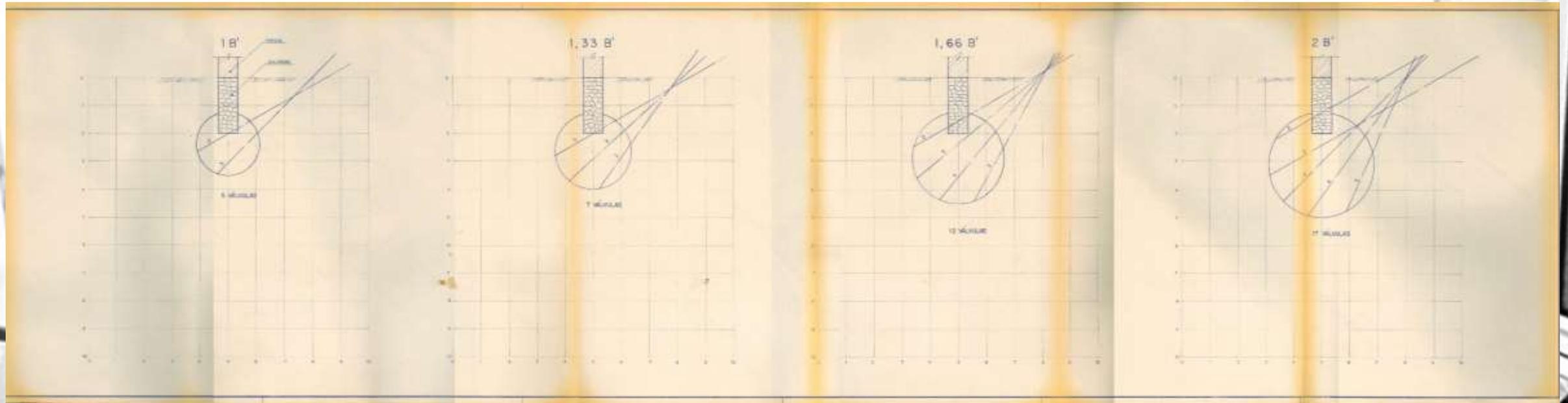
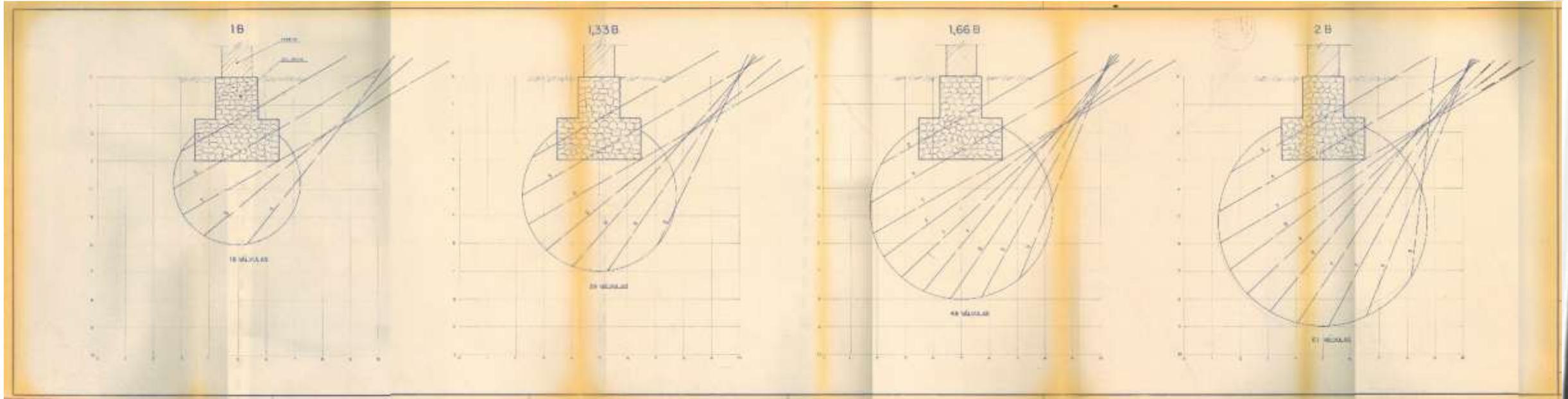
$\psi = 1,77$   
 $\alpha_v = \alpha_h$

# 8. ANTE-PROJETO DO REFORÇO DE FUNDAÇÃO

- A proposição considera o tratamento do sub-solo com injeção lenta de gel (para preencher os espaços vazios do solo) e depois da injeção de compactação com calda ou argamassa de cimento (para a compactação do solo).
- São previstas injeções de consolidação, abaixo da base dos blocos da fundação, atingindo profundidades variáveis entre 2B (parede frontal) até 1B (parede de fundos), a validade da execução do tratamento do sub-solo por etapas, indicadas a seguir:
- **Etapas de Execução:**
  1. Injeção nas fundações das paredes da periferia, de 2,0 em 2,0 metros.
  2. Fechamento com consolidação das fissuras existentes no prédio, sem revestimento estético.
  3. Injeção nas fundações da primeira linha de parede paralela a parede frontal do prédio, de 2,0 em 2,0 m.
  4. Injeção de 1,0 em 1,0 metro na periferia e em todas as paredes do interior.

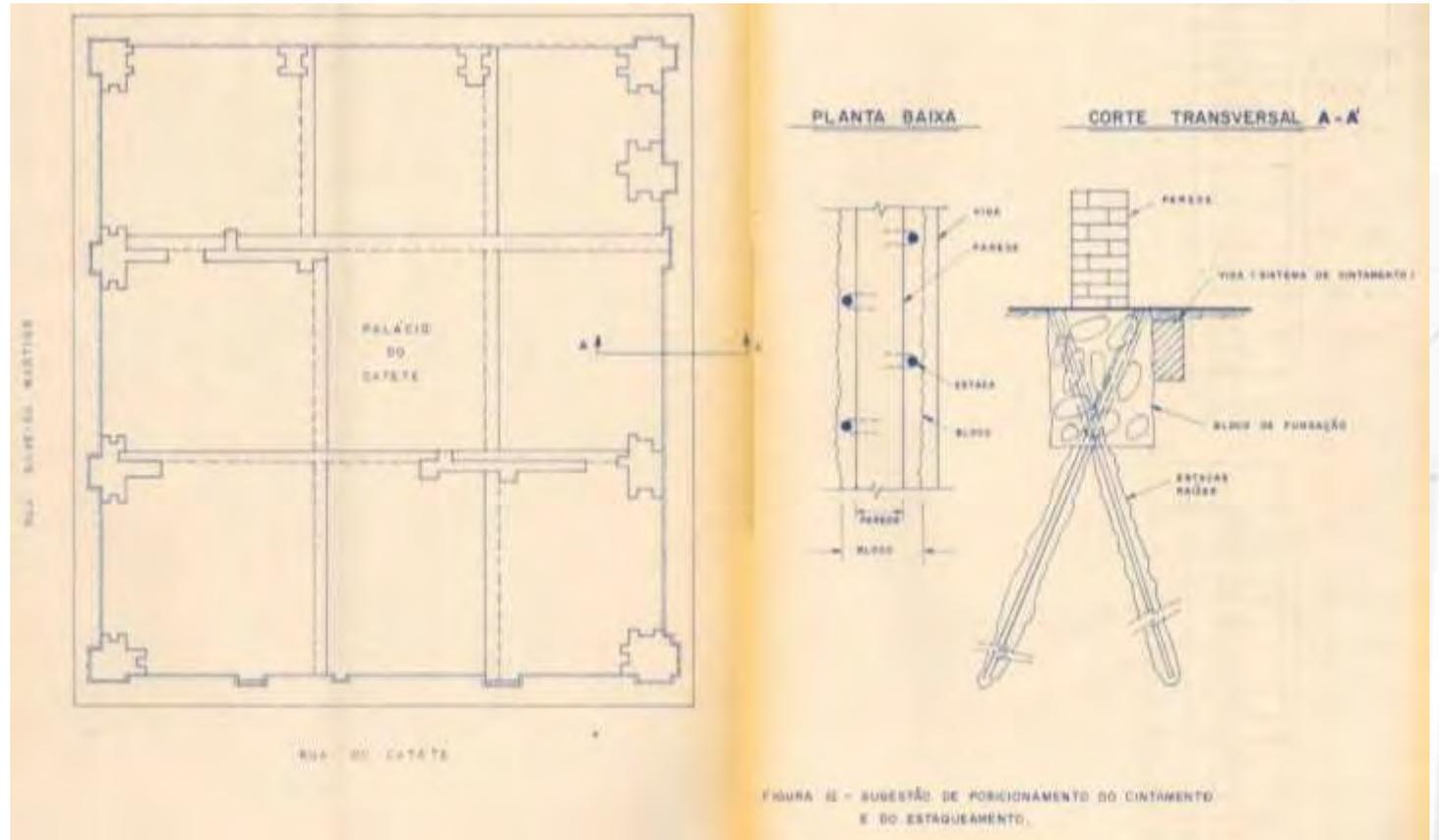


# 8. ANTE-PROJETO DO REFORÇO DE FUNDAÇÃO



# 9. BREVES COMENTÁRIOS SOBRE OUTRAS PROPOSIÇÕES

- Considerou-se a execução de radier-berço de concreto armado rígido ou completado com estaqueamento (estacas raízes ou presso-ancoragens), poderá apresentar sérias limitações:
  - Vulnerabilidade na fundação porque qualquer perturbação poderia desestabilizar o sistema solo - fundação.
  - Elevado custo de execução de tais proposições. Isso devido, principalmente, a forma bastante irregular da fundação existente.



## 9. BREVES COMENTÁRIOS SOBRE OUTRAS PROPOSIÇÕES

- O estaqueamento proposto, objetiva a transferência parcial de carga adicional para os extratos mais profundos.
- É importante neste exemplo citado, que estes dois novos elementos estruturais funcionem independentemente sem o prejuízo da interação com o bloco original da fundação.
- Realizaram-se ensaios piezométricos antes e depois das injeções e a medição de recalques.

“Toda estrutura (fundação) pode sofrer alguma alteração quando é solicitada por ações externas não consideradas no cálculo inicial, porém muitas vezes podem ser resolvidas aplicando as técnicas fornecidas pela Engenharia Geotécnica”

