

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

**Aula 2. Sondagens, Correlações empíricas, Recalques em fundações rasas**

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

1

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

**IMPORTÂNCIA DA INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO**

**Caracterização geológico-geotécnica da área de interesse:**

- Distribuição dos materiais presentes no local
- Parâmetros físicos dos materiais
- Previsão de comportamentos

**Indispensável para a definição:**

- Indicação do melhor local para obras civis
- Técnicas mais adequadas para intervenção no ter
- Volumes de remoção ou escavação

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

2

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

**FATORES DE INFLUÊNCIA NA INVESTIGAÇÃO**

- Risco
- Complexidade
- Fluxo das etapas de projeto
- Condicionantes Específicos
- Informações de monitoramento

Deslizamento em via expressa em Florianópolis      Desabamento de túnel Aeroporto de Heathrow (Reino Unido)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

3

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

**CONCEPÇÃO**

**Definição de características:**

- Material (solo, rocha, matacões, colapsível, expansivo, moles, presença de matéria orgânica, liquefação)
- Rupturas (algum processo já se iniciou? Quais rupturas a área está sujeita?)
- Deformações (adensamento ou rápidos elásticos, sobreposição de bulbos de tensões, compressibilidade)
- Erosão (carreamento de materiais? Retirada da camada superficial?)
- Água (nível do N.A., fluxo, capilaridade, variação sazonal)
- Estratigrafia (Camadas que constituem os horizontes do subsolo)

...

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

4

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### ASPECTOS RELEVANTES

- Associação entre ensaios próximos (ilhas de investigação) x aleatoriedade geológica

SPT 1 SPT 2 SPT 3 SPT 4

Solo 1  
Solo 2

1. Very conservative geologist's interpretation.  
2. Conservative geologist's interpretation.  
3. Optimistic geologist's interpretation.  
4. Extremely optimistic geologist's interpretation.

- Fatores éticos: utilização de ensaios de vizinhos, projetar sem sondagem, necessidade de F.S. = 3, análise laboratorial, negligência técnica, validade dos ensaios.

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

5

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO

- Ensaios complexos de laboratório e campo
- Monitoramento e instrumentação
- Número de prospecções
- Tipos de prospecções

RISCO LOCAL COMPLEXIDADE

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

6

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### ETAPAS DE UM PROJETO GEOTÉCNICO

ESTUDO DE VIABILIDADE

PROJETO BÁSICO

PROJETO EXECUTIVO

FASE OPERACIONAL

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

7

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### Reconhecimento preliminar

- Mapas topográficos
- Mapas geológicos
- Fotos aéreas/ satélite
- Visita ao local
- Ocupação anterior
- Estado construções vizinhas
- Mapeamento por drones (VANTS)

Deslizamento Ca' Lita, Emilia Romana, Itália (Google Earth Pro)

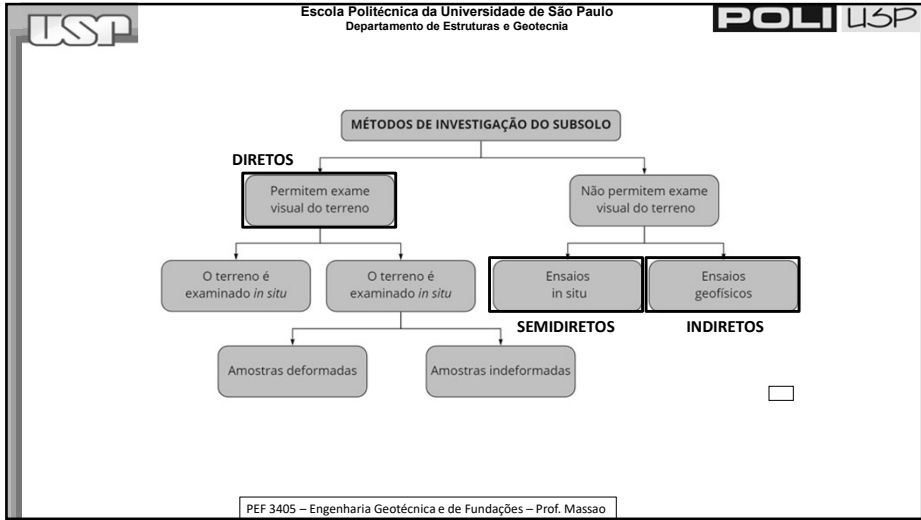
### Prospecção (investigação)

- Processos indiretos
- Processos semidiretos
- Processos diretos

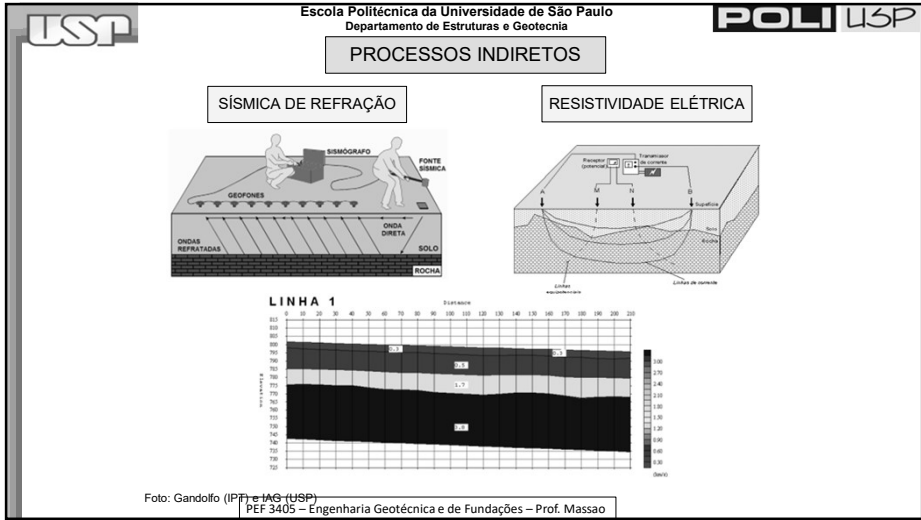
Foto: Arqplan

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

8



9



10

USP POLI USP  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Estruturas e Geotecnia

PROCESSOS DIRETOS

**Inspeção *in situ***  
Análise em campo através de taludes, poços ou trincheiras para reconhecimento em profundidade

**Coleta de amostras**

**Amostras indeformadas:**  
Coleta manual (blocos)  
Amostradores de parede fina

**Amostras deformadas:**  
Trado  
Escavação manual  
Amostradores de parede grossa

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

11

USP POLI USP  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Estruturas e Geotecnia

Coleta de amostras indeformadas

A recolha pode se dar através da abertura de poços de inspeção/ extração de amostras

- Adensamento;
- Cisalhamento direto;
- Compressão simples;
- Triaxiais.

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

12

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

Coleta de amostras deformadas

Coleta em ensaios SPT pelo próprio amostrador padrão ou por meio de equipamentos de recolha de material como trados.

- Teor de umidade;
- Granulometria;
- Limites de consistência;
- Peso específico real dos grãos

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

13

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

Amostrador de parede fina (SHELBY ou DENISON)

**DENISON:** Amostras indeformadas de solos mais resistentes (rijos e compactos). Necessário uso de sondagem rotativa

**SHELBY:** Para argilas e siltes argilosos (solos moles e de baixa resistência)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao Fonte: PUC-RJ

14

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

Amostrador de parede grossa

Utilização na sondagem de simples reconhecimento com SPT

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

15

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

SONDAGEM DE SIMPLES RECONHECIMENTO

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (SPT)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

16

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (SPT)

Foto: Solitec e Civilsolo

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

17

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (SPT)

Standard Penetration Test (SPT) Per. ASTM D 1586

Note: Occasional Fourth Increment Used to provide additional soil material

Need to Correct to a Reference Energy Efficiency of 60% (ASTM D 4633)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

18

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

MEDIÇÃO DO TORQUE APÓS REALIZAÇÃO DO ENSAIO SPT

TORQUÍMETRO: Estimativa do atrito lateral entre o amostrador e o solo, pode ser usado para a previsão de capacidade de carga de estacas

A adição de torque na sondagem à percussão é chamada de SPT-T

Fonte: Sondarell

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

19

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

PERFURAÇÃO COM CIRCULAÇÃO DE ÁGUA (FURO ABAIXO DO N.A.)

Trépano

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

20

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Estruturas e Geotecnia

**ENSAIO DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (SPT)**

©Copyright Prof. Dias-Segura

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

21

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Estruturas e Geotecnia

**EXEMPLO DE RESULTADO DE SONDAGEM (SPT)**

PROFUNDIDADE (m)	Nº DE ACÚSO (SPT)	RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO SPT (MPa)	RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO SPT (kg/cm²)	RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO SPT (ton/cm²)	PROFUNDIDADE DE CÁMARA (m)	PROFUNDIDADE DE CÁMARA (ft)	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	AVANÇO (m)
0.00	10	1.5	1.5	0.15	0.00	0.00	ATERRO DE AREIA FINA POUCA ARGILOSA, COR MARROM E CINZA VARIADO	1.66
0.16	12	1.8	1.8	0.18	0.16	0.52	AREIA FINA POUCA ARGILOSA, COR AMARELO E CINZA VARIADO	3.05
0.32	15	2.2	2.2	0.22	0.32	1.04	AREIA FINA POUCA ARGILOSA, COR CINZA AMARELADO	6.00
0.48	18	2.7	2.7	0.27	0.48	1.56		7.73
0.64	22	3.3	3.3	0.33	0.64	2.08		8.00
0.80	26	4.0	4.0	0.40	0.80	2.60		
1.00	32	4.8	4.8	0.48	1.00	3.28		
1.20	38	5.7	5.7	0.57	1.20	3.96		
1.40	45	6.8	6.8	0.68	1.40	4.64		
1.60	52	8.1	8.1	0.81	1.60	5.32		
1.80	60	9.6	9.6	0.96	1.80	6.00		
2.00	68	11.2	11.2	1.12	2.00	6.68		
2.20	75	13.0	13.0	1.30	2.20	7.36		
2.40	82	15.0	15.0	1.50	2.40	8.04		
2.60	90	17.1	17.1	1.71	2.60	8.72		
2.80	98	19.4	19.4	1.94	2.80	9.40		
3.00	105	21.9	21.9	2.19	3.00	10.08		
3.20	112	24.6	24.6	2.46	3.20	10.76		
3.40	120	27.6	27.6	2.76	3.40	11.44		
3.60	128	30.9	30.9	3.09	3.60	12.12		
3.80	135	34.5	34.5	3.45	3.80	12.80		
4.00	142	38.4	38.4	3.84	4.00	13.48		
4.20	150	42.6	42.6	4.26	4.20	14.16		
4.40	158	47.1	47.1	4.71	4.40	14.84		
4.60	165	51.9	51.9	5.19	4.60	15.52		
4.80	172	57.0	57.0	5.70	4.80	16.20		
5.00	180	62.4	62.4	6.24	5.00	16.88		
5.20	188	68.1	68.1	6.81	5.20	17.56		
5.40	195	74.1	74.1	7.41	5.40	18.24		
5.60	202	80.4	80.4	8.04	5.60	18.92		
5.80	210	87.0	87.0	8.70	5.80	19.60		
6.00	218	93.9	93.9	9.39	6.00	20.28		
6.20	225	101.1	101.1	10.11	6.20	20.96		
6.40	232	108.6	108.6	10.86	6.40	21.64		
6.60	240	116.4	116.4	11.64	6.60	22.32		
6.80	248	124.5	124.5	12.45	6.80	23.00		
7.00	255	132.9	132.9	13.29	7.00	23.68		
7.20	262	141.6	141.6	14.16	7.20	24.36		
7.40	270	150.6	150.6	15.06	7.40	25.04		
7.60	278	160.0	160.0	16.00	7.60	25.72		
7.80	285	169.8	169.8	16.98	7.80	26.40		
8.00	292	180.0	180.0	18.00	8.00	27.08		
8.20	300	190.5	190.5	19.05	8.20	27.76		
8.40	308	201.3	201.3	20.13	8.40	28.44		
8.60	315	212.4	212.4	21.24	8.60	29.12		
8.80	322	223.8	223.8	22.38	8.80	29.80		
9.00	330	235.5	235.5	23.55	9.00	30.48		
9.20	338	247.5	247.5	24.75	9.20	31.16		
9.40	345	259.8	259.8	25.98	9.40	31.84		
9.60	352	272.4	272.4	27.24	9.60	32.52		
9.80	360	285.3	285.3	28.53	9.80	33.20		
10.00	368	298.5	298.5	29.85	10.00	33.88		
10.20	375	312.0	312.0	31.20	10.20	34.56		
10.40	382	325.8	325.8	32.58	10.40	35.24		
10.60	390	340.0	340.0	34.00	10.60	35.92		
10.80	398	354.6	354.6	35.46	10.80	36.60		
11.00	405	369.6	369.6	36.96	11.00	37.28		
11.20	412	384.9	384.9	38.49	11.20	37.96		
11.40	420	400.5	400.5	40.05	11.40	38.64		
11.60	428	416.4	416.4	41.64	11.60	39.32		
11.80	435	432.6	432.6	43.26	11.80	40.00		
12.00	442	449.1	449.1	44.91	12.00	40.68		
12.20	450	466.0	466.0	46.60	12.20	41.36		
12.40	458	483.3	483.3	48.33	12.40	42.04		
12.60	465	501.0	501.0	50.10	12.60	42.72		
12.80	472	519.0	519.0	51.90	12.80	43.40		
13.00	480	537.3	537.3	53.73	13.00	44.08		
13.20	488	556.0	556.0	55.60	13.20	44.76		
13.40	495	575.1	575.1	57.51	13.40	45.44		
13.60	502	594.6	594.6	59.46	13.60	46.12		
13.80	510	614.5	614.5	61.45	13.80	46.80		
14.00	518	634.8	634.8	63.48	14.00	47.48		
14.20	525	655.5	655.5	65.55	14.20	48.16		
14.40	532	676.6	676.6	67.66	14.40	48.84		
14.60	540	698.1	698.1	69.81	14.60	49.52		
14.80	548	720.0	720.0	72.00	14.80	50.20		
15.00	555	742.3	742.3	74.23	15.00	50.88		
15.20	562	765.0	765.0	76.50	15.20	51.56		
15.40	570	788.1	788.1	78.81	15.40	52.24		
15.60	578	811.6	811.6	81.16	15.60	52.92		
15.80	585	836.5	836.5	83.65	15.80	53.60		
16.00	592	861.9	861.9	86.19	16.00	54.28		
16.20	600	887.8	887.8	88.78	16.20	54.96		
16.40	608	914.2	914.2	91.42	16.40	55.64		
16.60	615	941.1	941.1	94.11	16.60	56.32		
16.80	622	968.5	968.5	96.85	16.80	57.00		
17.00	630	996.4	996.4	99.64	17.00	57.68		
17.20	638	1024.8	1024.8	102.48	17.20	58.36		
17.40	645	1053.7	1053.7	105.37	17.40	59.04		
17.60	652	1083.1	1083.1	108.31	17.60	59.72		
17.80	660	1113.0	1113.0	111.30	17.80	60.40		
18.00	668	1143.4	1143.4	114.34	18.00	61.08		
18.20	675	1174.3	1174.3	117.43	18.20	61.76		
18.40	682	1205.7	1205.7	120.57	18.40	62.44		
18.60	690	1237.6	1237.6	123.76	18.60	63.12		
18.80	698	1270.0	1270.0	127.00	18.80	63.80		
19.00	705	1302.9	1302.9	130.29	19.00	64.48		
19.20	712	1336.3	1336.3	133.63	19.20	65.16		
19.40	720	1370.2	1370.2	137.02	19.40	65.84		
19.60	728	1404.6	1404.6	140.46	19.60	66.52		
19.80	735	1439.5	1439.5	143.95	19.80	67.20		
20.00	742	1474.9	1474.9	147.49	20.00	67.88		

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

22

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Estruturas e Geotecnia

**NÚMERO MÍNIMO E LOCAÇÃO DE SONDAGENS**

Área de projeção de construção (m²)	Nº mínimos de furos (NBR 8036)	Outras recomendações
<200	2	-
200 a 600	3	-
600 a 800	4	-
800 a 1000	5	-
1000 a 1200	6	-
1200 a 1600	7	-
1600 a 2000	8	-
2000 a 2400	9	-
2400 e 5000	a critério	12
5000 a 10000	a critério	12 a 20
Acima de 10000	a critério	uma a cada 500 m²

**EVITAR ALINHAMENTO ENTRE OS FUROS**

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

23

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Estruturas e Geotecnia

**ESTADO DOS SOLOS A PARTIR DO N<sub>SPT</sub>**

**Compacidade Relativa das Areias**

Fofa	Pouco compacta	Medianamente compacta	Compacta	Muito compacta
4	8	18	30	40

**Consistência das Argilas**

Muito mole	Mole	Média	Rija	Dura
2	5	10	19	30

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

24

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### SONDAGEM ROTATIVA (SR)

$L = 38 \text{ cm}$   
 $L = 17 \text{ cm}$   
 $L = 0$   
 $L = 20 \text{ cm}$   
 $L = 35 \text{ cm}$   
 $L = 0$

$$RQD(\%) = \frac{\sum l_i (> 10 \text{ cm})}{L} \cdot 100$$

Fontes: Suporte (Sondagem e Investigação), Deere (1989), CONOTEST  
PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

25

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### CLASSIFICAÇÃO PELO RQD

RQD	Rock mass quality
<25%	very poor
25-50%	Poor
50-75%	Fair
75-90%	Good
90-100%	Excellent

0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 m

RQD = 0  
RQD = 0  
RQD = 100  
RQD = 100

Fonte: Deere (1989)  
PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

26

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### SONDAGEM MISTA (SM)

A sondagem mista é a execução da sondagem à percussão (SP) em conjunto com a rotativa (SR)

Trado

Parada NBR 6484

Rotativa com recuperação de testemunho e determinação de RQD

Avanço a trado ou lavagem e medidas de Nspt

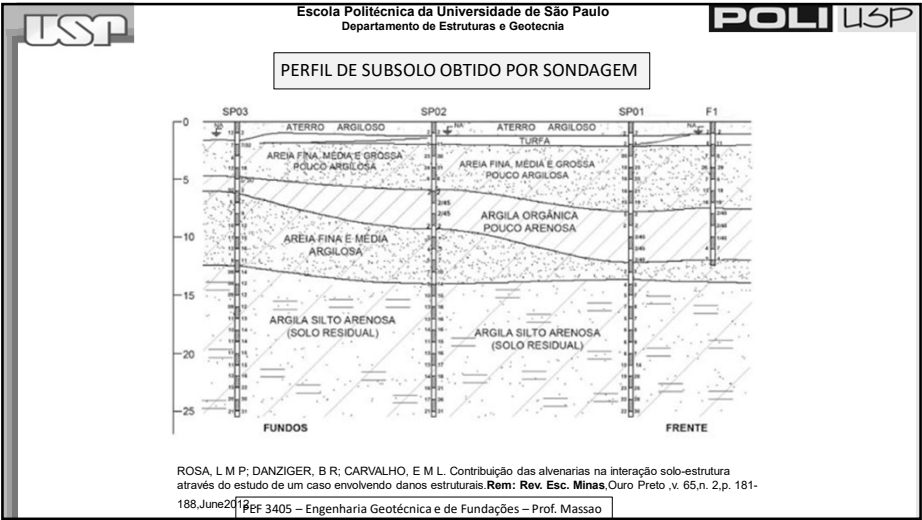
PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

27

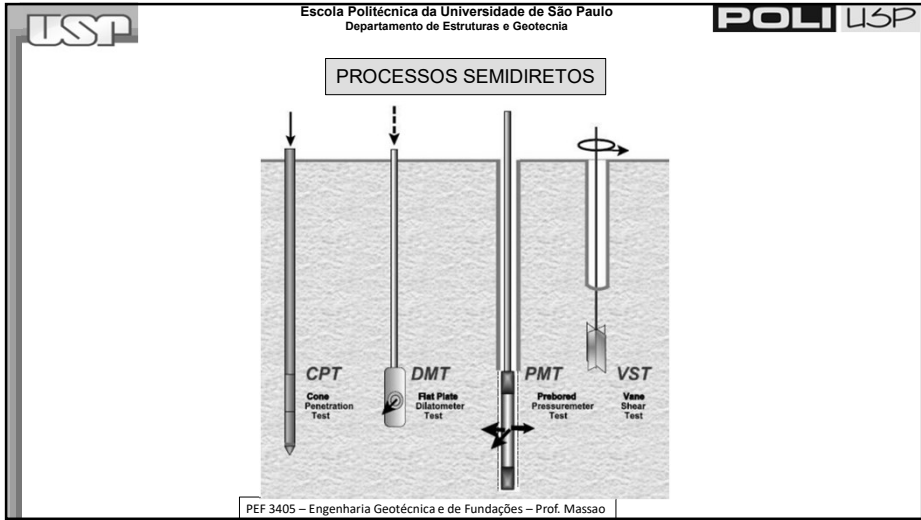
USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

Fonte: Machado, M. A., Borges, W., 2013. Aplicação do GPR como método auxiliar na pesquisa mineral de depósitos arenosos para a construção civil: caso da jazida de Canil, Brasília/DF. 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brasil  
PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

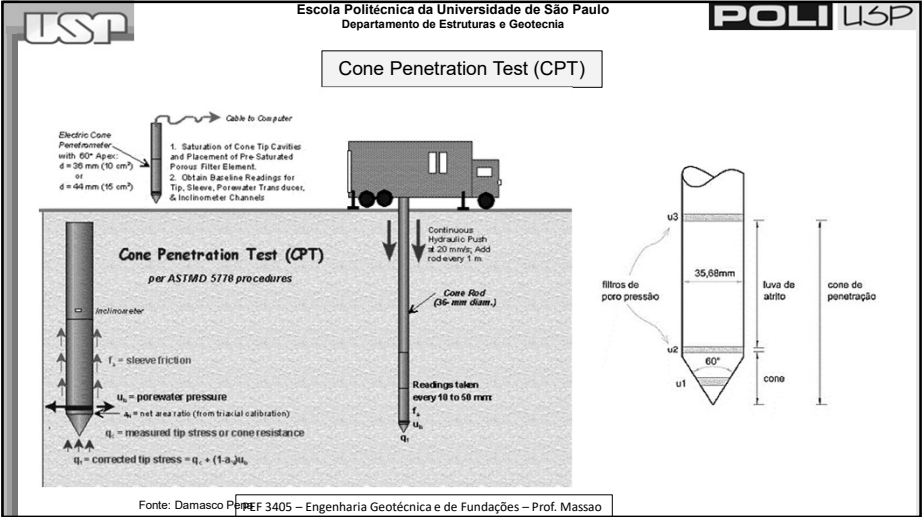
28



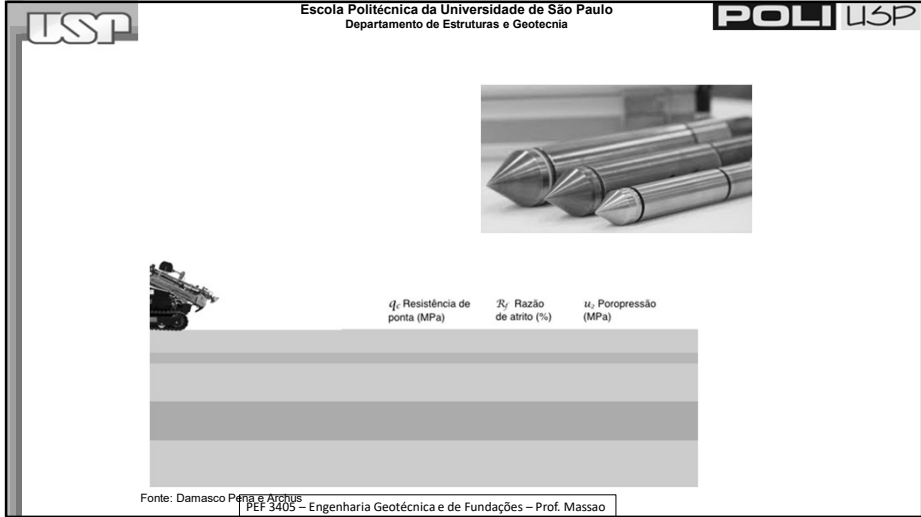
29



30



31



32



USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### RESULTADO CPTu

Atrito lateral ←  $f_s$

Poros-pressão ←  $u_b$

Resistência de ponta ←  $q_t$

Razão de atrito:  $R_f(\%) = \frac{f_s}{q_t} \cdot 100$

Fonte: Damasco Pena

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### Carta de classificação dos solos - CPTu (Robertson et al., 1986)

Célula de carga ( $q_c$ )

Poropressão ( $u_2$ )

Resistência de ponta ( $q_t$ )

$$a = \frac{A_n}{A_t}$$

$$q_t = q_c + u_2 \cdot (1 - a)$$

SBI	Tipo de comportamento do solo
1	Solos finos sensíveis
2	Solos orgânicos
3	Argila
4	Argila silteosa a argila
5	Silte argiloso a argila silteosa
6	Silte arenoso a silte argiloso

SBI	Tipo de comportamento do solo
7	Areia silteosa a silte arenoso
8	Areia a areia silteosa
9	Areia
10	Areia pedregulhosa a areia
11	Solo fino muito rijo*
12	Areia a areia pedregulhosa*

SBT: Soil Behavior Type

Fonte: Damasco Pena

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### DMT

Calibrations of Membrane Stiffness in Air:  $\Delta A = 10$  to 30 kPa (junction)  $\Delta A = 30$  to 60 kPa (inlet)

Incremental Hydraulic Push at 20 mm/s; Stop to test every 200 mm (or 300 mm)

Plan or Face View

Profile Views

1. Initial

2. Push

3. A-reading

4. B-reading

5. Deflate Rapidly

FLAT DILATOMETER TEST (DMT)

$p_1$  = Lift-off pressure (corrected "A" reading)

$p_2$  = Expansion pressure (corrected "B" reading)

Eurocode 7 – Geotechnical Design – Part 3 – “Design assisted by field testing” – Section 9 – Flat Dilatometer Test (DMT)

Fonte: Damasco Pena

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### Pressiômetro de Ménard PMT

Pressuremeter Test (PMT) ASTM D 4719

Screw Pump: 1. Each Full Rotation of Piston Cylinder Forces an Incremental Volume of Water (or Gas or Oil) Into the PMT Probe. 2. Measure Corresponding Pressure at each increment.

Rubber Membrane of Probe Expands as a right cylinder. Evaluated per Cylindrical Cavity Expansion Theory.

Plot Pressure  $U$  versus Volume Change  $\Delta V$  (or alternatively, Volumetric Strain or Cavity Strain) to Find Pressuremeter Parameters:

- $p_1$  = Lift-Off Pressure
- $E$  = Elastic Modulus
- $T_{max}$  = Shear Strength
- $F_1$  = Limit Pressure

Fonte: Damasco Pena

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### Vane Test

Torque

Palheta

Superfície de Cisalhamento

condição indeformada

condição remoldada

relação (graus)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

37

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### CORRELAÇÕES

argila arenosa-siltosa

solo arenoso-siltoso

IMPENETRÁVEL

$\gamma_{sat} = 15kN/m^3$   $Surgão = 50kPa$   
 $w = 26\%$   $N_{60} = 4$   
 $c = 5kPa$   $f_c = 40kPa$   
 $\phi = 20^\circ$   $q_c = 23kPa$   
 $e = 1,5$   $T_{vc} = 0,02kN/m$   
 $E = 12kPa$

$\gamma_{sat} = 16kN/m^3$   $Surgão = 60kPa$   
 $w = 32\%$   $N_{60} = 17$   
 $c = 26kPa$   $f_c = 160kPa$   
 $\phi = 22^\circ$   $q_c = 2,2kPa$   
 $e = 1,6$   $T_{vc} = 0,19kN/m$   
 $E = 13kPa$

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

38

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### CORRELAÇÕES

#### Peso específico ( $\gamma$ )

Godoy (1972) Solos argilosos			Godoy (1972) Solos arenosos				
$N_{SPT}$	Compacidade	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	$N_{SPT}$	Compacidade	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )		
					Areia seca	Úmida	Saturada
$\leq 2$	Muito mole	13	< 5	Fofa	16	18	19
3 a 5	Mole	15	5 a 8	Pouco compacta	17	19	20
6 a 10	Média	17	9 a 18	Medianamente compacta	18	20	21
11 a 19	Rija	19	19 a 40	Compacta			
$\geq 20$	Dura	21	>40	Muito compacta			

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

39

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### CORRELAÇÕES

#### Peso específico ( $\gamma$ )

Robertson (2010)

$$\frac{\gamma}{\gamma_w} = 0,27 \cdot [\log R_f] + 0,36 \cdot \log \left( \frac{q_c}{P_a} \right) + 1,236$$

$R_f$  = razão de atrito  
 $\gamma_w$  = peso específico da água  
 $P_a$  = pressão atmosférica, mesma unidade de  $q_c$   
 $P_a = 101 kPa$

Dimensionless Cone Resistance ( $q_t/P_a$ )

Friction Ratio,  $R_f = (f_s/q_t) \times 100(\%)$

Dimensionless Soil Unit Weights,  $\gamma/\gamma_w$  ( $\gamma_w$  = unit weight of water)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

40

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

**CORRELAÇÕES**

**Ângulo de atrito ( $\phi$ )**

**CPTU**

Robertson & Campanella (1983)

$$\tan \phi' = \frac{1}{2,68} \left[ \log \left( \frac{q_c}{\sigma'_{v0}} \right) + 0,29 \right]$$

Kulhawy & Mayne (1990)

$$\phi = \tan^{-1} \left( 0,1 + 0,381 \cdot \log \left( \frac{q_c}{\sigma'_{v0}} \right) \right)$$

**SPT**

Godoy (1983)

$$\phi = 28^\circ + 0,4 \cdot N_{SPT}$$

Teixeira (1996)

$$\phi = \sqrt{20 \cdot N_{SPT}} + 15^\circ$$

Hatanaka e Uchida (1996)

$$\phi = \sqrt{20 \cdot N_{SPT}} + 20^\circ$$

41

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

**CORRELAÇÕES**

**Coesão do solo ( $c$ )**

Teixeira & Godoy (1996)

$$c = 10 \cdot N_{SPT} \text{ (kN / m}^2\text{)}$$

Décourt (1989)

$$c = 12,5 \cdot N_{SPT} \text{ (kN / m}^2\text{)}$$

**Importante**

Deve-se ter cuidado ao utilizar as correlações para a coesão do solo, um parâmetro de coesão alto pode estar associado aos efeitos aparentes. Desta forma, sendo possível superestimar a superfície de ruptura.

Qual a coesão de um aterro e solos arenosos?

42

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

**CORRELAÇÕES**

**Resistência não drenada ( $S_u$ )**

Lunne e Kleven (1981)

$$S_u = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{N_K}$$

$N_K$ -varia entre 15 e 28,4

$\Rightarrow c_u = S_u \cdot 0,5$

Soil Type	Name and Year	$N_K$ values
Normally consolidated clay	Lunne and Kleven (1981)	11-19
Medium soft clay	Kiousis et al. (1988)	8,5
Scandinavian Marine clays	Jøss (1998)	20 (Marine clay) 15 (Boulder clay)
Different soil types	Gebreselassie (2003)	7,6-28,4
Malaysia soils	Chen (2001)	5-12
Boom clay	Van Empe (2004)	13-24
Fine-grained soils	Almeida et al. (2010)	4-16

Robertson e Cabal (2012)

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{Kt}}$$

$N_{Kt}$ -varia entre 10 e 18

Bowles (1988)

$$N_{Kt} = 13 + \frac{5,5}{50} I_p \pm 2$$

$I_p$  é o índice de plasticidade

Autor	Local/Solo	$N_{Kt}$
Rocha Filho e Alencar (1985)	Sarapu/RJ	10-15
Danziger (1990)	Sarapu/RJ	8-12
Coutinho, Oliveira e Danziger (1993)	Recife/PE	10-15
Árabe (1995b)	Vale Quilombo/SP	12-15
Soares, Schimid e Bica (1997)	Porto Alegre/RS	8-16
Sandroni et al. (1997)	Sergipe	14-18
Balista e Sayão (1998)	Salvador/BA	12-18

43

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

**CORRELAÇÕES**

**Módulo de deformabilidade ( $E_s$ )**

Schmertmann (1978) - solos

$$E_s = 2,5 \cdot \left[ 1 + 0,4 \cdot \log \left( \frac{L}{B} \right) \right] \cdot q_c$$

Trofimenkov (1974) - areias

$$E_s = 130 + 3,4 \cdot q_c$$

Kulhawy e Mayne (1990) - solos

$$E_s = 8,25 \cdot (q_c - \sigma_{v0})$$

Teixeira e Godoy (1996)

$$E_s = \alpha \cdot q_c = \alpha \cdot K \cdot N_{SPT}$$

Solo	$\alpha$	Solo	K(MPa)
Areia	3	Areia com pedregulhos	1,1
Silte	5	Areia	0,9
Argila	7	Areia siltosa	0,7
		Areia argilosa	0,55
		Silte arenoso	0,45
		Silte	0,35
		Argila arenosa	0,3
		Silte argiloso	0,25
		Argila siltosa	0,2

44

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

**Módulo de deformabilidade ( $E_s$ )**

Décourt (1995)

$$E_s = \alpha \cdot N_{SPT}$$

Solo	$\alpha$
Areias	3,5
Solos intermediários	3,0
Argilas saturadas	2,5

**Módulo de cisalhamento ( $G_0$ )**

Stroud (1988)

$$G_0 = 7,0 \cdot N_{SPT} (MN / m^2)$$

Barros (1992)

$$G_0 = 47,5 \cdot N_{SPT}^{0,72} (MN / m^2)$$

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 45

45

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

**CORRELAÇÕES**

**Rochas**

(Hoek e Diederichs, 2006)

Módulo de elasticidade do **maciço**

$$E_{rm} = 10^5 \frac{1 - D/2}{1 + \exp[(75 + 25D - GSI)/11]}$$

Conhecendo o módulo da rocha intacto:

$$E_{rm} = E_i \left\{ 0,02 + \frac{1 - D/2}{1 + \exp[(60 + 15D - GSI)/11]} \right\}$$

GSI: Geological Strength Index (mapeamento de campo)

D: Dano oriundo do processo construtivo (não aplicável a todo o maciço), varia de 0 até 1,0

Lista de valores típicos:

Rock Type	$\rho$ (lb/ft <sup>3</sup> ) [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosity %	E (ksi) [GPa]	Poisson's Ratio
Igneous	(138 - 187) [2210 - 3000]	0.10 - 22.1	(1450 - 14504) [10 - 100]	0.10 - 0.40
Granite	(158 - 164) [2530 - 2620]	1.02 - 2.87	(4351 - 10153) [30 - 70]	0.17
Diorite	(175 - 187) [2800 - 3000]	0.10 - 0.50	(4351 - 14504) [30 - 100]	0.10 - 0.20
Gabbro	(170 - 187) [2730 - 3000]	1.00 - 5.57	(5802 - 14504) [40 - 100]	0.20 - 0.35
Rhyolite	(150 - 162) [2400 - 2600]	0.40 - 4.00	(1450 - 7252) [10 - 50]	0.20 - 0.40
Andesite	(156 - 175) [2500 - 2800]	0.20 - 8.00	(1450 - 10153) [10 - 70]	0.20
Basalt	(138 - 173) [2210 - 2770]	0.22 - 22.1	(5802 - 11603) [40 - 80]	0.10 - 0.20
Sedimentary	(114 - 172) [1820 - 2760]	-	(725 - 13053) [5 - 90]	0.10 - 0.30
Conglomerate	(154 - 172) [2470 - 2760]	-	(1450 - 13053) [10 - 90]	0.10 - 0.15
Sandstone	(119 - 161) [1910 - 2580]	1.62 - 26.4	(2176 - 7252) [15 - 50]	0.14
Shale	(125 - 150) [2000 - 2400]	20.0 - 50.0	(725 - 4351) [5 - 30]	0.10
Mudstone	(114 - 170) [1820 - 2720]	-	(725 - 10153) [5 - 70]	0.15
Dolomite	(137 - 169) [2200 - 2700]	0.30 - 4.00	(4351 - 10153) [30 - 70]	0.15
Limestone	(167 - 170) [2670 - 2720]	0.27 - 4.10	(2901 - 10153) [20 - 70]	0.30
Metamorphic	(136 - 206) [2180 - 3300]	-	(725 - 13053) [5 - 90]	0.15 - 0.30
Gneiss	(163 - 195) [2610 - 3120]	0.32 - 1.16	(4351 - 11603) [30 - 80]	0.24
Schist	(162 - 178) [2600 - 2850]	10.0 - 30.0	(725 - 8702) [5 - 60]	0.15 - 0.25
Phyllite	(136 - 206) [2180 - 3300]	-	(1450 - 12239) [10 - 85]	0.26
Slate	(169 - 174) [2710 - 2780]	1.84 - 3.64	(2901 - 13053) [20 - 90]	0.20 - 0.30
Marble	(157 - 179) [2510 - 2860]	0.65 - 0.81	(4351 - 10153) [30 - 70]	0.15 - 0.30
Quartzite	(163 - 167) [2610 - 2670]	0.40 - 5.9	(725 - 13053) [50 - 90]	0.17

Fonte: J. Schön, Physical Properties of Rocks, Volume 65: Fundamentals and Principles of Petrophysics. Netherlands.

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 46

46

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

**CORRELAÇÕES**

**Rochas**

**Resistência à compressão uniaxial (UCS)**

Field Estimate of Strength	Examples	Strength (MPa)
Specimen can only be chipped with a geological hammer.	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite.	>250
Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it.	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff.	100-250
Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it.	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale.	50-100
Cannot be scraped or peeled with a pocket knife; specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer.	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone.	25-50
Can be peeled with a pocket knife with difficulty; shallow indentations made by firm blow with point of a geological hammer.	Chalk, rocksalt, potash.	5-25
Crumbles under firm blows with point of a geological hammer; can be pested by a pocket knife.	Highly weathered or altered rock.	1-5
Indented by thumbnail.	Stiff fault gouge.	0.25-1

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 47

47

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

**RECALQUES EM FUNDAÇÕES RASAS**

The diagram illustrates the relationship between foundation stiffness and soil settlement. It is divided into four quadrants based on foundation type (flexible vs. rigid) and soil type (sand vs. clay).

- Top-Left (Areias, Fundação flexível):** Shows a trapezoidal contact pressure distribution on sand, resulting in a settlement profile that is concave upwards.
- Top-Right (Argilas, Fundação flexível):** Shows a rectangular contact pressure distribution on clay, resulting in a settlement profile that is concave downwards.
- Bottom-Left (Areias, Fundação rígida):** Shows a parabolic contact pressure distribution on sand, resulting in a settlement profile that is concave upwards.
- Bottom-Right (Argilas, Fundação rígida):** Shows a U-shaped contact pressure distribution on clay, resulting in a settlement profile that is concave downwards.

Fonte: DAS (2006)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 48

48

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### RECALQUES EM FUNDAÇÕES RASAS

**Equação geral para cálculo de recalques**

$$S_T = S_c + S_s + S_e$$

$S_T$  = recalque total  
 $S_c$  = Recalque de adensamento (consolidação) primária  
 $S_s$  = Recalque de adensamento secundária  
 $S_e$  = Recalque elástico

Stage I ( $S_c$ ): compressão inicial (pré-carregamento)  
 Stage II ( $S_s$ ): adensamento primário durante o qual o excesso de pressão neutra é gradualmente transferida para a tensão efetiva por causa da expulsão da água nos poros  
 Stage III ( $S_s$ ): adensamento secundário que ocorre após a completa dissipação da pressão neutra, quando alguma deformação ocorre devido ao reajuste plástico ou viscoplastico.

Fonte: DAS (2006)

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 49

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### Recalque elástico ( $S_e$ )

Boussinesq (1885)

$$S_e = \sigma \cdot B \cdot \left[ \frac{1 - \nu^2}{E_s} \right] \cdot I_w$$

$\sigma$  = tensão média  
 $B$  = menor dimensão em planta da sapata  
 $E_s$  = módulo de deformabilidade do solo  
 $\nu$  = coeficiente de Poisson  
 $I_w$  = fator de influência

Tipo de Placa	Flexível	
	Centro	Borda ou Canto
Circular	0,79	1,00
Quadrada	0,85	1,11
Retangular	LB = 2	1,17
	LB = 5	1,66
	LB = 10	2,10
		2,54

Fator de influência  $I_w$

Camada semi-infinita e recalque imediato em meio elástico homogêneo em placa flexível ou rígida, quadrada ou retangular

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 50

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### Recalque elástico ( $S_e$ )

Janbu et al. (1956)

$$S_e = \frac{\mu_0 \cdot \mu_1 \cdot \sigma \cdot B}{E_s}$$

$\sigma$  = tensão média  
 $B$  = menor dimensão em planta da sapata  
 $E_s$  = módulo de deformabilidade do solo  
 $\mu_0$  e  $\mu_1$  = embutimento da sapata e espessura da camada de solo

Camada finita e recalque imediato em meio elástico homogêneo sobre material indeslocável

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 51

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### Recalque adensamento primário ( $S_c$ )

$$\Delta H = \frac{H}{1 + e_0} \cdot \left( C_r \cdot \log \frac{\sigma'_a}{\sigma'_{v0}} + C_c \cdot \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta \sigma}{\sigma'_a} \right)$$

$e_0$  = índice de vazios inicial  
 $H$  = espessura da camada  
 $C_c$  = índice de compressão  
 $C_r$  = índice de recompressão  
 $\sigma'_{v0}$  = tensão inicial  
 $\sigma'_a$  = tensão de pré-adensamento  
 $\Delta \sigma$  = tensão aplicada

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 52

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### Recalque adensamento secundário (S<sub>z</sub>)

Em função da **deformação específica**:

$$C_{\alpha\epsilon} = \frac{\Delta H/H_0}{\Delta \log_{10} t}$$

Em função do índice de vazios:

$$C_{\alpha\epsilon} = \frac{\Delta e}{\Delta \log_{10} t}$$

Correlação entre as definições:

$$C_{\alpha\epsilon} = \frac{C_{\alpha\epsilon}}{1 + e_0}$$

*C<sub>α</sub> (coeficiente de adensamento secundário) em função da deformação específica varia de 0,5% a 2% para argilas normalmente adensadas e podendo atingir valor de 3% ou mais para argilas muito plásticas*

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 53

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### Recalque total para solos arenosos

Schmertmann (1970,1978)

$$\rho_d = C_1 \cdot C_2 \cdot \sigma^* \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{I_z}{E_s} \cdot \Delta z \right)_i$$

$$C_1 = 1 - 0,5 \cdot \left( \frac{q}{\sigma^*} \right) \geq 0,5$$

$$C_2 = 1 + 0,2 \cdot \log \left( \frac{t}{0,1} \right)$$

Tensão líquida:  $\sigma^* = \sigma - q$

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 54

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### Recalque total para solos arenosos

Schmertmann (1970,1978)

$$\rho_d = C_1 \cdot C_2 \cdot \sigma^* \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{I_z}{E_s} \cdot \Delta z \right)_i$$

#### Sapatas quadradas ou circulares

Para  $0 \leq z \leq \frac{B}{2}$

$$I_z = 2 \left( \frac{z}{B} \right) \cdot (I_{z,max} - 0,1) + 0,1$$

Para  $\frac{B}{2} \leq z \leq 2B$

$$I_z = \left[ \frac{4}{3} - \frac{2}{3} \left( \frac{z}{B} \right) \right] I_{z,max}$$

#### Sapatas corridas

Para  $0 \leq z \leq B$

$$I_z = \left( \frac{z}{B} \right) \cdot (I_{z,max} - 0,2) + 0,2$$

Para  $\frac{B}{2} \leq z \leq 2B$

$$I_z = \left[ \frac{4}{3} - \frac{1}{3} \left( \frac{z}{B} \right) \right] I_{z,max}$$

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 55

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

### Recalque total para solos arenosos

Schmertmann (1970,1978)

$$\rho_d = C_1 \cdot C_2 \cdot \sigma^* \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{I_z}{E_s} \cdot \Delta z \right)_i$$

#### Sapatas retangulares

Para  $0 \leq z \leq \frac{3}{4}B$

$$I_z = \frac{4}{3} \left( \frac{z}{B} \right) \cdot (I_{z,max} - 0,15) + 0,15$$

Para  $\frac{3}{4}B \leq z \leq 3B$

$$I_z = \left[ \frac{4}{3} - \frac{4}{9} \left( \frac{z}{B} \right) \right] I_{z,max}$$

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao 56

USP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Estruturas e Geotecnia

POLI USP

**Sugestões de leitura**

Velloso e Lopes, 2011, Fundações Critérios de Projeto, Capítulos 3 e parte do 5

DAS, B. M., 2006, Principles of Geotechnical Engineering , capítulo 10 e 11

HACHICH, W., 2002, Fundações: Teoria e Prática. 2ª ed. Editora Pini, São Paulo

Pinto, C.S., 2006, Curso Básico de Mecânica dos Solos, Oficina de Textos

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e de Fundações – Prof. Massao

57