

São Paulo, 10 novembro de 2 005

Granel Química Ltda. - Terminal da Alemoa. Estudos de estabilidade de taludes.

Em atenção à solicitação de V.Sas., estamos apresentando os estudos de estabilidade geral desenvolvidos para determinar a inclinação adequada à construção dos taludes de mar, na área da Alemoa, à margem direita do Porto e Santos - SP.

1. Referências

Foram consultados os seguintes documentos técnicos fornecidos por V.Sas.:

.../...

- . Desenho s/nº, fl. 1/3, revisão 1, de título: Batimetria - Elevações - curvas de nível, emitido pela empresa Geometral - Engenharia e Topografia Ltda., em 09/12/04;
- . Relatório nº GR-1062/0805, emitido em outubro/05, pela firma Geopress - Serviços Geotécnicos Ltda., contendo os resultados de um programa de investigação geotécnica por nós estabelecido, a saber:

- perfis individuais de 8 sondagens à percussão com medida de torque (SPT-T), de números: de SPTT-01 a SPTT-08, sendo 4 furos em terra (os ímpares) e 4 furos em mar;
- ensaios de cisalhamento direto tipo vane-test em 8 perfurações executadas ao lado das sondagens, totalizando 41 pares de ensaios (natural e amolgado), em diversas profundidades.
- Ensaios laboratoriais em 41 amostras coletadas nas profundidades dos vane-test, com determinação de LL (limite de liquidez) e LP (limite de plasticidade).

2. Investigação Geotécnica

2.1 Sondagens à percussão

Foi estabelecida uma campanha de 8 sondagens do tipo SPT-T, ao longo do trecho de interesse, que está localizado praticamente na foz do Rio Casqueiro no Estuário, isto é, na

.../...

margem direita, trecho este com extensão da ordem de 450 m. Para tanto, foram executados 4 pares de sondagens (uma no mar e outra em terra, distantes em média 60,0 m), distribuídos ao longo do trecho em estudo.

A tabela a seguir apresenta a locação dos furos em coordenadas UTM e suas respectivas cotas de boca, em metros,

referidas ao zero DHN (NNRSM - novo nível de redução de sondagens da marinha).

As sondagens em mar foram executadas a partir de uma plataforma flutuante com 0,90 m de altura.

FURO	COORDENADAS - UTM		COTA DA BOCA - DHN	PROF. (m)	LÁMINA D'ÁGUA (m)
	NORTE	ESTE			
SPTT-01	7.353.900,	358.964,	0,72	42,89	-
SPTT-02	7.354.006,	358.976,	2,20	37,45	5,97
SPTT-03	7.353.880,	359.081,	0,72	43,91	-
SPTT-04	7.353.977,	359.093,	2,10	38,45	6,60
SPTT-05	7.353.890,	359.298,	0,72	41,90	-
SPTT-06	7.353.946,	359.287,	1,65	39,45	7,97
SPTT-07	7.353.895,	359.414,	0,75	42,70	-
SPTT-08	7.353.974,	359.405,	2,30	35,82	6,94

O subsolo local se apresenta como um espesso pacote de sedimentos, da ordem de 42,0 m, alternando camadas de argila orgânica siltosa com camadas de areia fina a média pouco argilosa.

.../...

O perfil do subsolo é o que segue:

- a) uma pequena camada de areia fina argilosa fofa ocorre apenas em dois furos de terra, com espessura de 2,60 m no SPTT-01 e com 1,45 m no furo SPPT-07;

- b) camada de argila orgânica siltosa, as vezes arenosa, de muito mole a mole, de resistência variando entre 0 e 4 golpes SPT, com espessura variável entre 9,25 m (SPTT-01) e 12,0 m (SPTT-03 e SPTT-05);
- c) no horizonte da cota média -11,28 m ocorre a presença de camada de areia fina argilosa fofa, com resistência da ordem de 2 golpes SPT, de espessura variável, entre 2,08 m (SPTT-01) e 7,60 m (SPTT-07). Esta camada não aparece em 2 furos de mar (SPTT-04 e SPTT-06), podendo esta singularidade, por serem os furos do meio do trecho de 450 m, representar possíveis rupturas antigas.
- d) em seqüência ocorre uma segunda camada de argila orgânica siltosa, de consistência entre mole a média (SPT entre 3 e 6 golpes), as vezes com presença de módulos de areia, com espessura variando entre 7,30 (SPTT-07) e 15,07 m (SPTT-01);
- e) camada de areia fina siltosa, no horizonte da cota média de -25,00 m de capacidade entre pouco compacta a medianamente compacta e as vezes compacta (SPTT-07), espessura variando entre 3,87 m SPTT-01) e 13,70 m (SPTT-07);
- .../...
- f) segue uma terceira camada de argila orgânica siltosa, média, SPT da ordem de 8 a 13 golpes, de espessura que varia entre 1,30 (SPTT-07) e 4,05 m (SPTT-03);
- g) no horizonte da cota -35,00 ocorre uma camada de areia (terceira camada) na forma de uma areia média a grossa

medianamente compacta a compacta (SPT entre 14 e 27 golpes), finalizando assim o pacote sedimentar.

- h) No horizonte definido entre as cotas -39,25 (SSPTT-07) e -42,88 (SPTT-03), as sondagens detectaram solo residual na forma de um silte arenoso, proveniente da alteração da rocha gnaisse. Nos furos de terra o lençol freático se apresentou aflorado.

2.2 Ensaio de Campo

Próximo às sondagens foram realizadas 8 perfurações para execução de ensaios de palheta vane-test em diversas profundidades das argilas moles, de modo a obter a coesão do material, que é a sua resistência ao cisalhamento.

A TABELA 1 a seguir apresenta os valores medidos da coesão natural e coesão amolgada, bem como os índices de plasticidade (IP).

Os valores de coesão natural foram corrigidos com base no IP, segundo a correção preconizada por Bjerrum.

.../...

T A B E L A 1 - E M T E R R A

VANE- TEST N ^N	COTA DO ENSAIO	COESÃO NATURAL (tf/m ²)	COESÃO AMOLGADA (tf/m ²)	IP %	u	COESÃO CORRIGIDA (tf/m ²)
VT-1	-3,28	4,22	1,64	34,1	0,89	3,8
	-7,28	4,92	1,29	95,5	0,63	3,1
	-9,78	4,28	1,82	23,9	0,96	4,1
	-14,28	7,97	1,58	33,7	0,86	6,9
	-17,28	9,55	3,52	91,0	0,64	6,1
	-21,28	17,11	4,04	60,2	0,75	12,7
VT-3	-3,28	3,11	0,53	64,4	0,72	2,2
	-5,28	4,04	1,29	55,3	0,76	3,1
	-7,28	3,69	0,67	47,3	0,81	3,0
	-15,28	9,55	1,11	70,1	0,70	6,6
	-19,28	12,19	1,47	36,8	0,87	10,6
VT-5	-2,28	3,22	0,59	64,3	0,72	2,3
	-6,28	4,34	1,49	94,4	0,63	2,7
	-9,28	4,31	0,82	67,5	0,71	3,1
	-18,28	19,00	7,62	67,6	0,71	13,5
	-21,28	13,07	0,65	61,3	0,74	9,6
VT-7	-2,25	4,98	2,05	55,1	0,77	3,8
	-5,25	5,24	3,57	52,0	0,78	4,1
	-8,25	4,78	2,46	65,5	0,72	3,4
	-21,25	8,64	3,55	67,3	0,71	6,1
	-23,25	9,43	4,42	72,7	0,69	6,5

.../...

T A B E L A 1 - E M M A R

VANE- TEST N ^N	COTA DO ENSAIO	COESÃO NATURAL (tf/m ²)	COESÃO AMOLGADA (tf/m ²)	IP %	u	COESÃO CORRIGIDA (tf/m ²)
VT-2	-7,00	1,99	0,23	47,9	0,80	1,6
	-14,00	5,95	4,42	48,2	0,80	4,8
	-16,00	15,53	3,28	91,5	0,64	9,9
	-18,00	11,60	9,96	62,7	0,73	8,4
	-20,00	14,36	6,74	59,1	0,75	10,8
VT-4	-7,00	1,49	0,12	72,7	0,69	1,0
	-12,00	7,91	6,77	71,3	0,70	5,5
	-15,00	13,89	2,75	65,4	0,72	10,0
	-18,00	11,34	8,03	88,5	0,64	7,3
	-21,00	12,48	2,40	60,1	0,74	9,2
VT-6	-9,00	1,41	0,88	54,5	0,77	1,1
	-14,00	13,65	2,70	54,7	0,77	10,5
	-16,00	8,64	3,55	92,9	0,63	5,4
	-20,00	12,07	2,34	86,6	0,65	7,8
	-23,00	13,77	8,03	65,2	0,72	9,9
VT-8	-7,00	2,34	0,64	59,6	0,74	1,7
	-9,00	5,68	0,70	71,5	0,70	3,9
	-17,00	7,38	3,34	99,3	0,63	4,6
	-19,00	10,90	5,00	69,9	0,70	7,6
	-22,00	19,87	5,74	79,8	0,67	13,3

.../...

3. Metodologia de Cálculo

Os cálculos de estabilidade foram desenvolvidos para cada uma das quatro seções obtidas com os pares de sondagens (terra/mar).

Plotados os valores das coesões corrigidas foram obtidas as seguintes retas de variação da coesão com a profundidade; sendo "z" em metros contados a partir da cota zero DHN:

Seção	$c = c_0 + c_1.z$ (tf/m ²)
SPTT-01/02	$c = 2,32 + 0,17 z$
SPTT-03/04	$c = 1,00 + 0,35 z$
SPTT-05/06	$c = 1,69 + 0,15 z$
SPTT-07/08	$c = 2,25 + 0,14 z$

As retas de variação da coesão estão apresentadas nos desenhos nº 1 a 4, em anexo.

Para os cálculos de estabilidade foram adotadas as seguintes premissas:

- . cota do topo do talude: 3,54 DHN (que é a cota acabada do ponto em geral)
- . cota do fundo do mar: -12,00 DHN (que é a cota atual do canal de acesso).

.....

. inclinação do talude: 1V : 3H

3.1 Subsolo totalmente em argila mole:

As análises de estabilidade foram realizadas com base na metodologia proposta pelo Prof. Carlos Souza Ponto, que contempla a verificação do fator de segurança contra a ruptura de taludes, em argilas moles profundas, com a coesão variando linearmente com a profundidade.

Os parâmetros necessários são:

- . altura do talude: H (m)
- . densidade aparente do aterro: g (tf/m³)
- . largura do talude: d (m)
- . espessura de solo mole abaixo do pé do talude: D (m)
- . reta da coesão: $c = c_0 + c_1 \cdot z$
- . tensão solicitante: q_s (tf/m²)
- . tensão resistente: q_r (tf/m²)

Para a seção definida pelas sondagens SPTT-02 tem-se:

. geometria:

cota do topo: +3,54 m

cota do pé: -12,00 m → $H = 15,54$ m

nível do mar: cota zero

para $i = 1V : 3H$ → $d = 3 \times 15,54 = 46,62$ m

.../...

. argila mole:

$$c = 2,32 + 0,17 z \quad \rightarrow \quad c_o = 2,32 \text{ tf/m}^2$$

$$c_1 = 0,17 \text{ tf/m}^3$$

espessura mole abaixo: $D = 13,3 \text{ m}$

. material do talude:

aterro de areia: cota +3,54 à cota zero

$$h_1 = 3,54 \text{ m}$$

$$g = 1,9 \text{ tf/m}^3$$

argila mole: cota zero à cota -12,0

$$h_2 = 12,0 \text{ m}$$

$$g' = 0,5 \text{ tf/m}^3$$

$$\frac{c_1 \times d}{c_o} = \frac{0,17 \times 46,62}{2,32} = 3,42$$

$$\frac{c_1 \times D}{c_o} = \frac{0,17 \times 13,3}{2,32} = 0,97 \quad \text{ábaco} \rightarrow N_{co} = 12,0$$

$$q_r = N_{co} \times c_o = 12,0 \times 2,32 = 27,84 \text{ tf/m}^2$$

$$q_s = (3,54 \times 1,9) + (12,0 \times 0,5) = 12,73 \text{ tf/m}^2$$

portanto

$$FS = \frac{q_r}{q_s} = \frac{27,84}{12,73} = 2,18$$

.../...

$$\underline{FS = 2,13} \quad (\text{folgado}).$$

- admitindo-se a aplicação de uma sobrecarga uniformemente distribuída de $4,0 \text{ tf/m}^2$, que é o valor de projeto usualmente utilizado em obras portuárias, tem-se:

$$q_r = 27,84 \text{ tf/m}^2$$

$$q_s = 12,73 + 4,0 = 16,73 \text{ tf/m}^2$$

$$FS = \frac{27,84}{16,73} = 1,66$$

$$\underline{FS = 1,66} \quad (\text{maior que FS mínimo} = 1,3).$$

Aplicando-se o mesmo método de cálculo para as demais seções pode-se apresentar a seguir a TABELA 2:

T A B E L A 2

Seção (SPTT)	c_o (tf/m^2)	C_1 (tf/m^2)	D (m)	N_{co}	q_r (tf/m^2)	Sem sobre carga		Com sobrecar ga= $4,0 \text{ tf/m}^2$	
						q_s (tf/m^2)	FS	q_s (tf/m^2)	FS
01/02	2,32	0,17	13,30	12,0	27,84	12,73	2,18	16,73	1,66
03/04	1,00	0,35	11,80	29,0	29,00	12,73	2,18	16,73	1,73
05/06	1,69	0,15	13,00	13,7	23,15	12,73	2,18	16,73	1,47
07/08	2,25	0,14	13,70	12,6	28,35	12,73	2,18	16,73	1,69

.../...

Os resultados acima obtidos, considerando-se somente a presença de argila mole profunda abaixo do fundo da dragagem (cota -12,00 DHN), determinam para a inclinação de talude 1V : 3H o seguinte:

- a) os fatores de segurança se apresentaram folgados para as quatro seções estudadas. O menor valor resultou em FS = 1,81, superior ao FS mínimo necessário igual a 1,3.
- b) Acrescentando-se a sobrecarga uniformemente distribuída de 4,0 tf/m² os fatores de segurança obtidos são superiores ao FS mínimo igual a 1,3, sendo o menor valor obtido de FS = 1,47 para a seção das sondagens SPTT-05/SPTT-06.

3.2 Subsolo em argila mole com camada de areia

Tendo em vista que as sondagens executadas no mar, nas duas extremidades, isto é as sondagens SPTT-02 e SPTT-08, apresentaram camada de areia fina no nível do fundo do mar a ser dragado (cota -12,00 DHN), resta-nos estudar a influência da presença de areia no pé dos taludes, na estabilidade dos mesmos.

Esse estudo foi elaborado em modelo computacional, aplicando-se o método de Bishop simplificado, que permite introduzir a referida camada de areia e discretizar em pequenas camadas o aumento da coesão da argila mole com a profundidade.

O perfil de subsolo utilizado nesta análise é o que segue:

.../...

. camada de aterro arenoso:

da cota +3,50 à cota ,\0,00

espessura: $h = 3,5$ m

densidade aparente: $g = 1,9$ tf/m³

ângulo de atrito: $\emptyset = 28^\circ$

coesão: $c = 0$

. camada de argila mole:

da cota 0,00 à cota -10,30

$h = 10,3$ m

$g' = 0,5$ tf/m³

$\emptyset = \text{zero}$

$c = 2,25 + 0,14 z$ (z medido a partir da cota 0,00)

. camada de areia fina argilosa:

da cota -10,30 à cota -15,20

$h = 4,9$ m

$g' = 0,9$ tf/m³

$\emptyset = 26^\circ$

$c = 0,5$ tf/m²

. camada de argila mole:

da cota -15,20 à cota -25,60

$h = 10,4$ m

$g' = 0,5$ tf/m³

.../...

$\emptyset = \text{zero}$

$$c = 2,25 + 0,14 z \text{ (z medido a partir da cota } 0,00)$$

. camada subjacente de areia fina:

da cota -25,60 em diante

$$g' = 1,1 \text{ tf/m}^3$$

$$\emptyset = 30^\circ$$

$$c = \text{zero}$$

Nestas condições para o talude 1V : 3H com 15,5 m de altura foi obtido FS = 1,8, o que é muito satisfatório (maior que FS mínimo 1,3), visto a presença de areia fina argilosa no pé do talude. O esquema de cálculo está em anexo.

Para as mesmas condições geometria e solo, se acrescentarmos uma sobrecarga uniformemente distribuída de 4,0 tf/m² na crista do talude, o fator de segurança global cai para FS = 1,35, ainda superior ao recomendado FS = 1,3. Ver esquema de cálculo anexo.

3. Conclusão

As sondagens executadas no mar indicaram duas situações distintas quanto ao subsolo situado no pé do talude (cota -12,00 DHN). Os furos externos (SPTT-02 e 08) apresentaram uma camada de areia fina argilosa, de espessura variável (entre 3,70 m e 4,90 m) à profundidade correspondente a cota -10,50 DHN. Nos furos

.../...

intermediários (SPTT-04 e 06) essa camada não ocorre, mas sim, espessa camada de argila mole até aproximadamente a cota -26,00 DHN.

A situação mais desfavorável, em termos de estabilidade, é quando ocorre a camada de areia no pé do talude. Neste caso foi obtido $FS = 1,8$ sem sobrecarga e $FS = 1,35$ com sobrecarga uniformemente distribuída de $4,0 \text{ tf/m}^2$.

Para o caso de apenas subsolo em argila mole profunda foram obtidos $FS = 1,81$ sem sobrecarga e $FS = 1,47$ com sobrecarga uniformemente distribuída de $4,0 \text{ tf/m}^2$.

Adotada a cota -12,00 DHN como fundo do mar a ser dragado e considerando-se o nível do terreno com aterro acabado na cota +3,54 DHN, recomendamos que os taludes submersos tenham a configuração de 1V : 3H.

Sendo o que se nos apresenta para o presente assunto, subscrevemo-nos,

Atenciosamente,

Sylmar de Castro Barletta