

COMPORTAMENTO DE ATERRO SOBRE SOLO MOLE NAS OBRAS DE EXPANSÃO DE UM PORTO MARÍTIMO NO LITORAL DE SANTA CATARINA, BRASIL.

EMBANKMENT BEHAVIOUR ON SOFT SOILS IN A PORT EXPANSION WORKS AT SANTA CATARINA COAST, BRAZIL

Silva, André; *Teknier Engenharia, São Paulo, Brasil, andre@tekniel.com.br*

Corgnier, Fabian; *Teknier Engenharia, São Paulo, Brasil, fabian@tekniel.com.br*

RESUMO

Os portos marítimos do litoral do estado de Santa Catarina são considerados como pontos essenciais da atividade econômica do estado, para além de serem considerados dos terminais mais ágeis e eficientes da América Latina. Em finais de 2016 foi dado o início dos trabalhos de expansão do terminal de cargas de um dos portos, numa área total de 105.000 m² na presença de solos moles, o qual exigiu o estabelecimento de um programa de investigações geotécnicas (SPT e CPTU), para uma caracterização adequada dos estratos argilosos. Essencial para a preparação prévia do terreno, numa primeira fase com a aplicação de uma malha de geodrenos e complementada posteriormente por um aterro com 8,5m de altura, onde 3,5m correspondiam a aterro de sobrecarga.

O presente trabalho propõe-se a apresentar e analisar o comportamento do aterro através dos resultados da instrumentação geotécnica constituída por placas de recalque, piezômetros elétricos multinível e indicadores de nível de água.

ABSTRACT

Seaports at the state of Santa Catarina (South Brazil) are considered essential to the economic activity of the region and are among the most agile and efficient ports in Latin America. At the end of 2016, work began on the expansion of the cargo terminal at one of the ports, with a total area of 105,000 m² in the presence of soft soils, which required the establishment of a geotechnical investigation program (SPT and CPTU), for an adequate characterization of the clayey strata. The preliminary preparation of the terrain consisted initially of the application of vertical drains, complemented later by an embankment of 8,5m height, where 3,5m corresponded to an overload charge.

The current article aims to present and analyze the behavior of the embankment and the soft soil through the results of the geotechnical instrumentation, and compare them with expected results. Monitoring data plan considered settlement plates, multilevel electric piezometers and water level indicators.

1 - INTRODUÇÃO

A presente publicação tem como objetivo a apresentação do projeto de expansão do monitoramento geotécnico da obra de ampliação do porto de Itapoá, localizada na cidade de Itapoá, no estado de Santa Catarina. Brasil.

A obra consistiu na expansão da área operacional e armazenamento do Porto de Itapoá através da implantação de um aterro sobre solo mole. A existência de solo mole normalmente resulta na ocorrência de recalques diferidos no tempo, que exigem muitas vezes o recurso a processos artificiais de aceleração do adensamento dessas camadas. Neste caso específico, a solução prevista considerou a aplicação de um pré-carregamento e ainda a instalação de drenos verticais.



Figura 1 – a) projeto de expansão do Porto de Itapoá; b) vista aérea da área de expansão do porto durante a movimentação do aterro de sobrecarga

Um plano abrangente de investigações geotécnicas e ensaios laboratoriais permitiu estabelecer perfis geológicos representativos e a estimar grandezas relevantes para o dimensionamento das malhas de drenos verticais e do aterro de sobrecarga.

A pré-carga é um método que permite realizar um aterro que transmita ao maciço uma carga superior aquela que se pretende transmitir na fase definitiva da obra. A carga em excesso só será retirada quando se tiverem verificado recalques de grandeza semelhante aos previstos.

A utilização de drenos verticais, é uma prática normalmente combinada com a pré-carga. Trata-se de um processo que consiste, na introdução, no maciço a adensar, de drenos verticais de material de elevada permeabilidade, o qual permite para além do escoamento vertical para as fronteiras drenantes, um escoamento radial para os drenos encurtando o percurso que a água tem de percorrer para abandonar o estrato argiloso.

Repare-se que o adensamento resulta também em outra consequência benéfica que é o aumento da resistência ao cisalhamento do solo devido ao fato de processo de adensamento implicar uma redução do índice de vazios e de teor em água do solo argiloso. (Fernandes, 2006)

2 - CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA

2.1 - Campanha de investigações geotécnicas

A campanha de investigação geotécnica consistiu na realização de ensaios do tipo SPT e CPTU complementados por ensaios laboratoriais de caracterização, triaxial UU e edométricos.

Foram realizados 13 ensaios de piezocone elétrico (CPTu) com medida da poro-pressão in situ e ensaios de dissipação em camadas de natureza coesiva e muito mole para a estimativa do coeficiente de consolidação horizontal (C_h).

A realização de ensaios com recurso ao piezocone elétrico permitiu a restituição de forma continua ao longo de toda a vertical dos valores de resistência de ponta (q_t), resistência lateral (f_s), relação de atrito (R_f) e poro-pressão (u), das quais, por meio de correlações consagradas pela bibliografia, foi possível obter a sucessão litostratigráfica e estimar os parâmetros de cálculo que governam os fenômenos de recalque e consolidação dos terrenos.

Além disso, em correspondência com alguns ensaios CPTu (CPTU-02, CPTU-03, CPTU-04, CPTU-05, CPTU-06 e CPTU-07) foram retiradas 14 amostras não perturbadas, em diferentes profundidades onde foram realizados ensaios laboratoriais: ensaios de classificação, ensaios triaxial UU e ensaios edométrico.

A campanha de investigação permitiu a geração de perfis geológicos representativos subdividindo a área de expansão total em áreas representativas, nas quais se pode fazer o respectivo dimensionamento dos geodrenos e estimativa dos recalques.



Figura 2 – a) localização dos ensaios CPTU;b) identificação de áreas com solo arenoso e mole aflorantes

Foi identificada uma ampla área com presença de turfa aflorante, para uma faixa de largura entre 90 a 150m, que ocorre ao longo do limite norte do pátio existente, destacada com coloração verde escura da

figura 2b.

De qualquer forma, e tal como ilustrado nas figuras 3 e 4, a presença de solo mole mais ou menos superficial é uma constante em todos os perfis logo a consolidação do terreno através de sobrecarga com geodrenos verticais é uma necessidade para que seja atendido o prazo de execução do empreendimento.

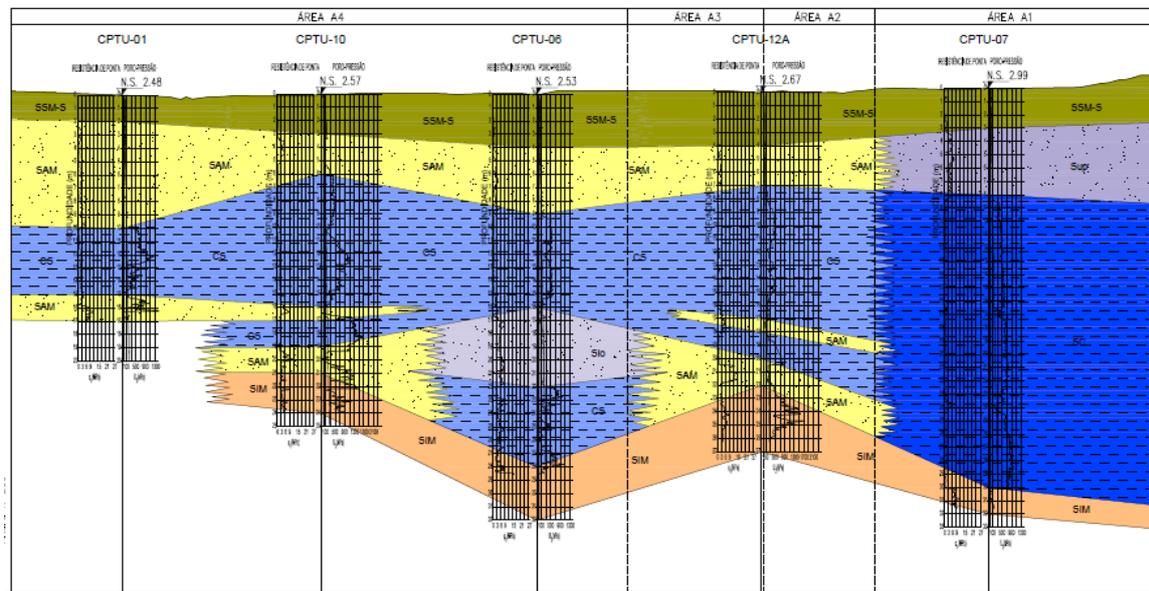


Figura 3 - Perfil geológico da área com solo mole aflorante baseado nos ensaios CPTU.

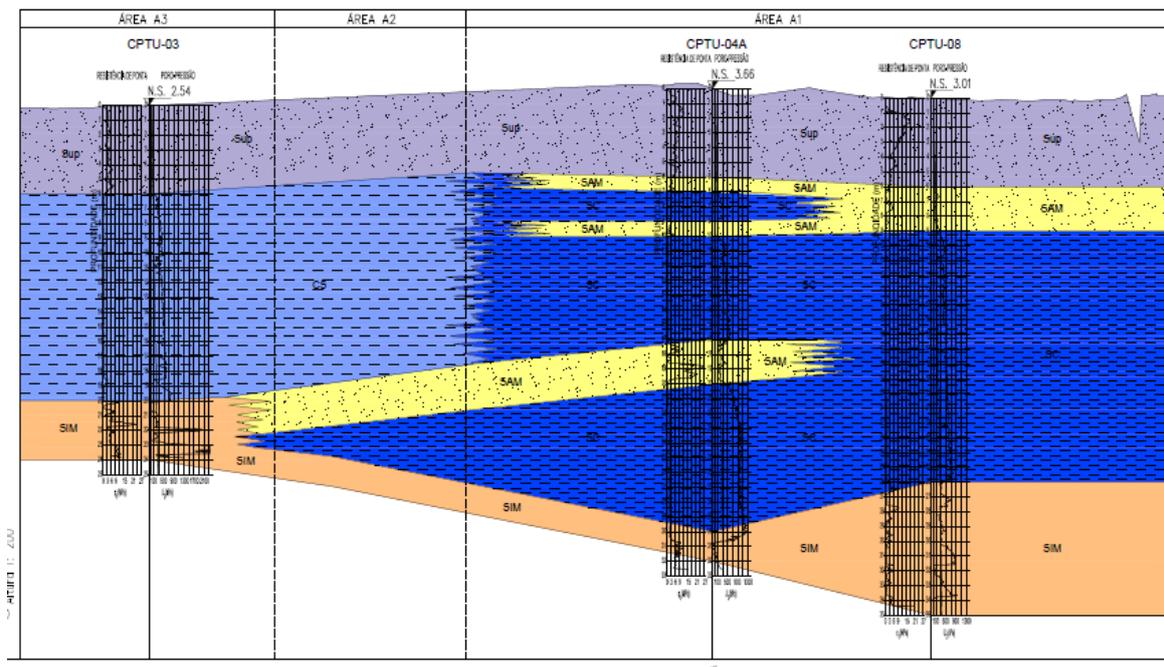


Figura 4 - Perfil geológico da área com solo arenoso aflorante baseado nos ensaios CPTU.

A interpretação das provas de dissipação durante os ensaios de piezocone, possibilitaram o cálculo de coeficiente de consolidação horizontal c_h e permeabilidade horizontal k_h .

Os resultados foram obtidos a partir da aplicação do método gráfico de Sully e o método analítico de Chai. Para fins de dimensionamento dos geodrenos consideraram-se os resultados obtidos com o método gráfico de Sully por ser mais cauteloso.

A seguir se indicam os coeficientes de consolidação c_h e a permeabilidade horizontal k_h , em relação as camadas coesivas, considerando para os cálculos de geodrenos, duas áreas: Área 1 e Área 2-3-4.

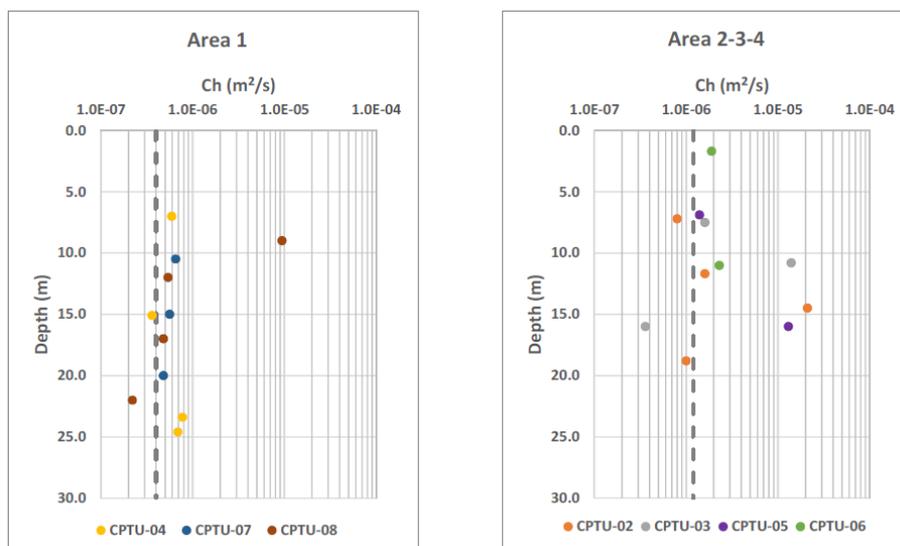


Figura 5 – Distribuição de resultados de coeficiente de consolidação horizontal c_h e permeabilidade horizontal k_h

A partir da análise estatística por área, e considerando a dispersão dos resultados, especialmente na área 2-3-4, consideraram-se para efeitos de cálculo os valores entre o mínimo e média registradas

ÁREA 1

$$c_h = 4.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k_h = 1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

ÁREA 2-3-4

$$c_h = 1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k_h = 3.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

Além disso, os parâmetros C_h e k_h são assumiram-se como constantes com a profundidade, porque como evidenciado pelos resultados do CPTU (Fig.5), não se observou uma particular variabilidade com a profundidade.

Por outro lado, os parâmetros verticais, assumiram-se como 1/3 dos horizontais, tal como recomendado pela literatura:

$$k_v = k_h / 3$$

$$c_v = c_h / 3$$

ÁREA 1

$$C_v = 1,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$K_v = 3,3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$$

ÁREA 2-3-4

$$C_v = 4,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$K_v = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

Os ensaios edométricos realizados posteriormente, revelaram valores de permeabilidade vertical na ordem de grandeza de $1,0 \times 10^{-10}$ a $1,0 \times 10^{-11}$, o que se aproxima das estimativas iniciais para a área 1 e menores para a área 2-3-4

3 - DRENOS VERTICAIS

As investigações geotécnicas permitiram elaborar perfis geológicos que levaram à subdivisão da área total em 5 áreas características em termos de espaçamento, profundidade e tipologia dos drenos, tal como ilustrado na Fig.6 e indicado no Quadro 1

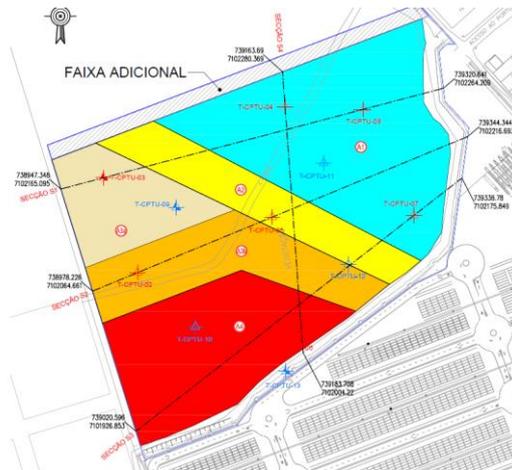


Figura 6 – Divisão em áreas características A1,A2,A3a,A3b e A4

Quadro 1 – Características geométricas dos geodrenos de acordo com a localização

Área	CPTU de Referência	Geodreno			Prazo sobrecarga esperado (dias)
		i (m)	L (m)	Tipologia	
1	04-07-08-11	1,5	28	T1	120-135
2	05	2,5	25	T2	90-120
3a	03-09	2,5	20	T2	120-135
3b	02-12	2,5	16	T2	100-120
4	01-06-10	3,25	16	T2	115-130

T1- geodrenos Romadrain 90, vazão dreno in situ $q=1.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

T2- geodrenos Drenatec 65, vazão dreno in situ $q=6.3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$

4 - PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO

O plano de instrumentação geotécnica previu a instalação de 12 placas de recalque, 11 pontos com 24 piezômetros elétricos em profundidades distintas e um indicador de nível de água (INA) fora da área de intervenção para monitorar as variações de nível de água, ilustrado na Fig 7. As campanhas de leitura foram executadas, diariamente, no caso dos piezômetros elétricos e INA e duas vezes por semana para as placas de recalque durante os 11 meses de obra.

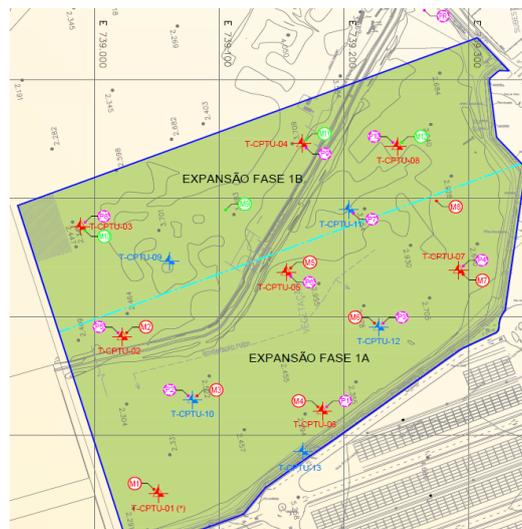


Figura 7 – Localização dos instrumentos (placas de recalque, piezômetros elétricos multinível e INA)

4.1 - Placas de recalque

As placas de recalque são utilizadas para medidas de recalque através da diferença de cota inicial da ponta da haste e, após a execução do aterro e acréscimos das hastes, das cotas obtidas em leituras posteriores, permitindo assim o acompanhamento dos recalques ao longo do tempo. Elas são largamente utilizadas em aterros sobre solos moles, em aterros com presença de geodrenos e onde há presença de sobrecarga temporária onde o deslocamento vertical deve ser monitorado.



Figura 8 -a) Instalação de placas de recalque nivelada em contato com solo natural; b) conservação das hastes de alteamento das placas com manilhas de concreto para proteção de eventuais impactos de equipamentos de obra

4.2 - Piezômetros elétricos

O piezômetro elétrico é constituído por um corpo metálico de forma cilíndrica onde internamente é alocado um transdutor de pressão complementado por um filtro frontal poroso em aço sinterizado. A pressão da água deforma a membrana unida com o sensor o qual converte a pressão em um sinal elétrico, interpretado pela leitora portátil. Os piezômetros utilizados foram do tipo OTR 200 AoS com capacidade de medição até 500kPa.

Maioria dos piezômetros, à exceção do PZ-01, foram instalados em multinível, ou seja, mais que um piezômetro no mesmo furo com o objectivo de acompanhar o comportamento dos estratos argilosos em diferentes profundidades na geração e dissipação de excessos de poro pressão.

Quadro 2 - Tabela resumo da profundidades de instalação dos piezômetros elétricos multinível

Piezômetro	Nível		
	N1 (m)	N2 (m)	N3 (m)
1	13,0	-	-
2	9,3	14,3	19,3
3	12,0	20,5	-
4	14,3	20,0	25,5
5	13,0	18,5	-
6	14,5	23,5	-
7	15,0	25,5	-
8	8,5	15,0	-
9	14,0	23,0	28,0
10	15,0	23,0	-
PR	13,0	25,0	-

Os piezômetros de referência (PR) e o indicador de nível de água foram instalados fora da área de intervenção da obra, ou seja, onde não se verificou alteamento de maneira a seguir o comportamento do maciço fora de região do aterro. Além disso, foi igualmente importante acompanhar a variação do nível freático visto se tratar de uma região sujeita a variação do N.A por ação da maré ou condições meteorológicas associadas a precipitação intensa.

5 - RESULTADOS DE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA

5.1 - Recalques

A execução do aterro ocorreu em duas fases. Numa primeira fase, entre os meses de fevereiro e maio de 2017 que abrangeu as áreas monitoradas pela placas PR-01 a PR-08 e uma segunda fase entre julho e agosto através das placas PR-09 a PR-12.

A análise concentrou-se na divisão entre as áreas identificadas com solo mole superficial, ilustrado na Fig.9 e o outro com solo arenoso, ilustrado na Fig.10.

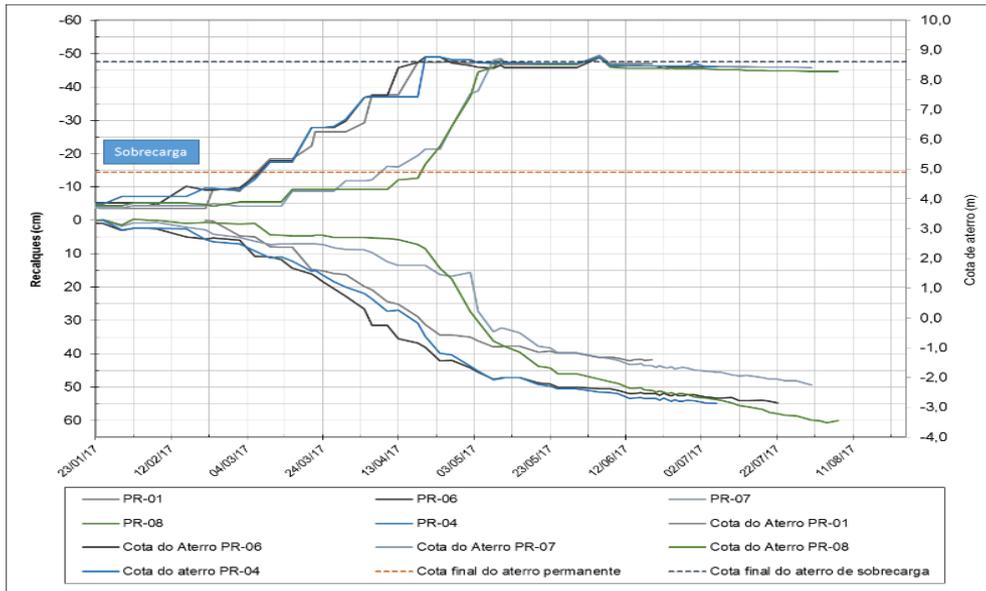


Figura 9 - Evolução de recalques durante a aplicação do aterro de sobrecarga na área com solo mole aflorante

Com os valores de recalque verificados ao longo do período de monitoramento entre janeiro e novembro de 2017 foi possível estabelecer um mapa de distribuição de recalques que possibilita uma melhor percepção espacial das áreas com maiores recalques e a sua localização.

No mapa apresentado é possível constatar que os maiores recalques, entre 40 a 60cm, aconteceram na região das placas, PR-01, PR-04, PR-06, PR-07, PR-08 e PR-12. A mesma área identificada na figura 2 e 3 como área com solo mole aflorante, com exceção da PR-12, portanto coerente com o comportamento esperado para aquela região. Por outro lado, os resultados para as placas instaladas na região de areia aflorante encontram-se em cerca de metade daqueles sob solo mais compressível, isto é, entre 12 a 45 cm.

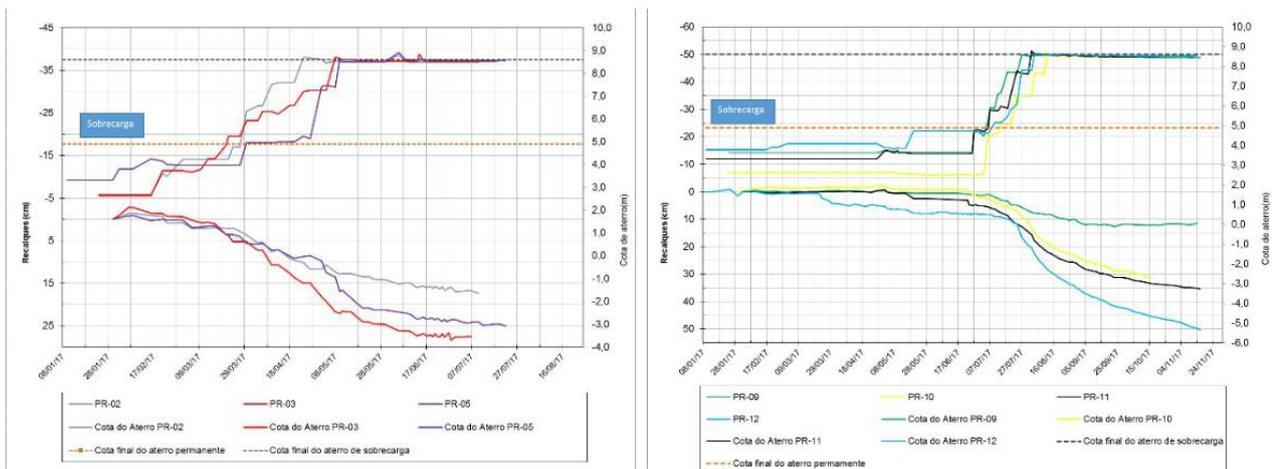


Figura 10 - Evolução de recalques durante a aplicação do aterro de sobrecarga na área com solo arenoso aflorante



Figura 11 – Mapa de distribuição de recalques

5.2 - Dados piezométricos

A seguir são apresentados os resultados gráficos do acompanhamento de alguns pontos de monitoramento do aterro. Onde são disponibilizados gráficos individuais de cada piezômetro vs evolução do aterro, de maneira a obter uma melhor visualização da variação das poropressões com a subida do aterro.

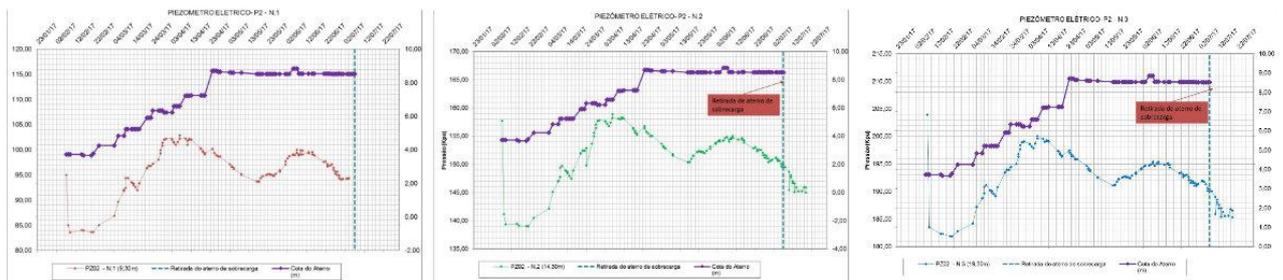


Figura 12 – Acompanhamento de dados piezométricos em PZ-02 em diferentes profundidades (9.3m/14.3m/19.3m)

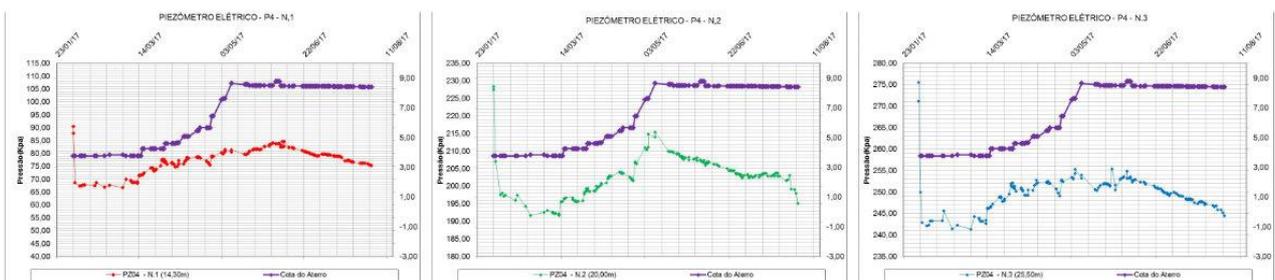


Figura 13 - Acompanhamento de dados piezométricos em PZ-04 em diferentes profundidades (14.3m/20.0m/25.5m)

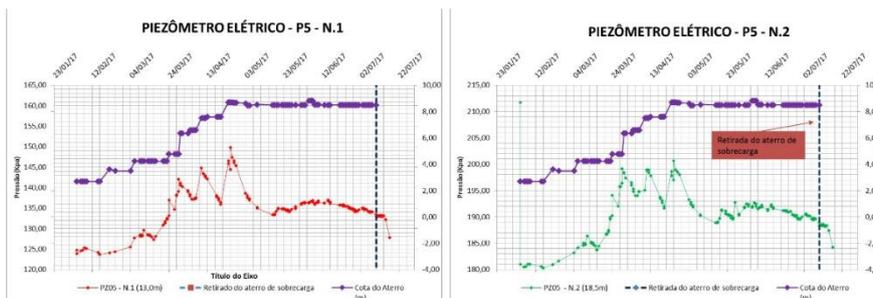


Figura 14 - Acompanhamento de dados piezométricos em PZ-05 em diferentes profundidades (13.0m/18.5m)

As figuras 12, 13 e 14 representam 3 dos 11 pontos monitorados por piezômetros elétricos em diferentes profundidades, todos eles reativos aos momentos de subida do aterro com registro de excessos de poro pressão. As dissipações ocorreram durante a manutenção da cota dos patamares de aterro, embora com geração de novas sobrepressões durante novos alteamentos, como pode ser observado no caso do PZ-05. Por outro lado, em PZ-04 demonstrou sobrepressões geradas até aplicação total do aterro de sobrecarga, seguido por um processo de dissipação contínuo e PZ-02 com sobrepressões geradas até meio do total do aterro de sobrecarga, seguido por uma dissipação e um novo ciclo de ganho e perda de pressão. Nos três é possível observar comportamentos distintos da poro pressão. As leituras dos piezômetros apresentaram variações entre 10 a 61kPa certamente associado à subida do aterro nesses pontos ou até áreas vizinhas. As maiores variações ocorreram no primeiro nível, entre 8,5 a 15m de profundidade, provavelmente por se localizarem em estratos mais superficiais, susceptíveis à maior influência dos bulbos de tensões provenientes da sobrecarga. Os outros dois níveis, localizados em profundidades maiores, entre 15 e 28m, apresentaram menores variações entre 10 e 30 kPa. O indicador de nível de água apresentou variações de nível freático entre 0,9m a 1,50m a contar topo do furo de instalação.

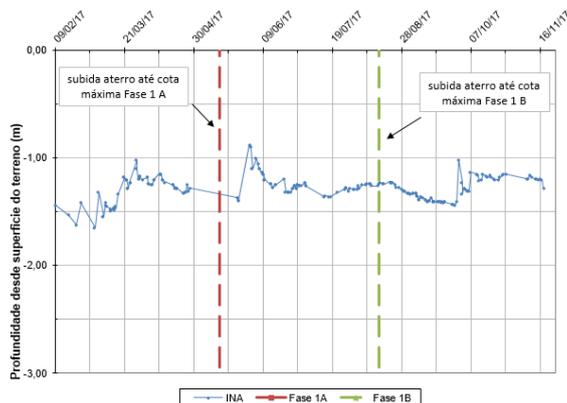


Figura 15 – Variação do nível de água fora da área de aterro

6 - ANÁLISE DE RESULTADOS

Após a conclusão do aterro e posterior retirada da sobrecarga, o conjunto de dados resultante do monitoramento de recalque permitiu a comparação das previsões em projeto com o realmente ocorrido. Considerando as duas áreas principais destacadas em pontos anteriores, uma com solo mole e outra de características mais arenosas

As duas grandezas principais comparáveis são:

- Magnitude de recalques
- Tempo de aplicação de sobrecarga

Quadro 3 – Comparação entre recalques previstos para consolidação total e recalques reais

Área	Recalque previsto para consolidação total (cm)	Recalque real (cm)
Solo mole Aflorante	110	40-60
Solo arenoso aflorante	45	10-35

Quadro 4 – Comparação entre tempos de sobrecarga previstos e reais

Área	Prazo sobrecarga esperado (dias)	Prazo sobrecarga real (dias)
1	120-135	80-110
2	90-120	70
3a	120-135	75
3b	100-120	75-90
4	115-130	60-75

Tal como indicado no Quadro 3, observa-se a ocorrência de recalques totais em cerca de metade do previsto para a região com solo mole superficial. Para a região mais arenosa a diferença não foi tão significativa. Apesar disto, a região prevista para a ocorrência de maiores recalques revelou-se acertada.

Quanto ao tempo previsto para o processo de adensamento este também foi menor que o previsto, com prazos de aplicação de sobrecarga entre os 55% a 80% do prazos previstos inicialmente.

Estas diferenças podem estar associadas à sobrestimativa de parâmetros fulcrais para o estudo deste tipo de fenômenos como os coeficientes de permeabilidade e de consolidação dos estratos argilosos e a utilização destes, para efeitos de aproximação e cálculo, em diferentes áreas de intervenção. Pois, tal como referido no ponto 2.1, o cálculo dos geodrenos foi realizado pelo lado da segurança.

No entanto, a representatividade destes parâmetros trata-se de uma questão pertinente e recorrente em vários projetos do género devido à dificuldade da sua determinação. (Schnaid et al, 2010)

7 - CONCLUSÕES

A instrumentação geotécnica é uma ferramenta essencial para acompanhar projetos de aterro sobre solo mole, por se tratarem de projetos com diversas variáveis a poder influenciar os resultados finais. Logo, tornou-se muito importante no entendimento dos processos de consolidação do terreno e validação ou reajuste dos pressupostos considerados em fase de projeto, tornando-se em muitos casos num processo iterativo de execução e análise com intuito de diminuir os riscos geotécnicos associados.

Resumindo, o comportamento distinto entre piezômetros e das placas de recalque reflete a heterogeneidade e complexidade do processo de adensamento, demonstrando a sua dependência de vários fatores, tais como:

- Estratigrafia e fronteiras drenantes (existência de solo mole, condições de contorno, histórico de tensões, heterogeneidade das camadas, espessura, permeabilidade e coeficientes de adensamento dos estratos, tal como a existência de lentes de areia entre camadas argilosas)
- Densidade da malha de geodrenos
- Sobrecarga (altura do aterro de sobrecarga, variações do peso específico do aterro devido à intensa precipitação e velocidade de subida do aterro)

A capacidade de previsão do comportamento de estratos com solo mole permanece como um dos maiores desafios da geotecnia mesmo tendo à disposição métodos mais avançados de caracterização e modelação de geotécnica, comprovando que o método observacional implícito à instrumentação geotécnica mantém-se como a base do entendimento deste tipo de casos.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial à Piacentini Tecenge Brasil pela colaboração e por ter partilhado as informações do projeto executivo e autorizado a utilização dos dados resultantes da instrumentação geotécnica para a publicação deste artigo.

REFERÊNCIAS

- Almeida, M., Marques, M.E.S, (2014) – *Aterro sobre solos moles – projeto e desempenho 2ªed*, Oficina de textos, São Paulo, Brasil
- Fernandes, M.M (2006) – *Mecânica dos solos – Conceitos e princípios fundamentais Vol.1*, FEUP Edições, Porto, Portugal
- Schnaid, F., Consoli, N.C., Dalla Rosa, F., Rabassa, C. (2010) – The role of in situ testing on interactive design on soft clay deposits. *Symposium on New Techniques for Design and Construction in Soft Clays*, Guarujá, Brazil.