Melhoramento rápido de solos moles com drenos a vácuo

Petroquímica Etileno XXI, Coatzacoalcos (Veracruz), México

ROBERTO KOCHEN* - HABIB GEORGES JARROUGE NETO**
IZABEL GOMES BASTOS*** - RENATO ARAUJO****

Para viabilizar as estratégias de crescimento da Braskem, esta adquiriu uma área com cerca de 250 hectares na região de um polo petroquímico no município de Coatzacoalcos, Estado de Veracruz, México, para a construção de uma planta de produção de etileno.

Segundo a Braskem, este empreendimento deve dobrar a capacidade da empresa, de produção de etileno. A produção na época era estimada por 1 milhão de toneladas por ano.

Desta forma, iniciou-se o projeto Etileno XXI.

O empreendimento é composto por uma planta de craqueamento térmico de etano com capacidade produtiva de um milhão de toneladas de etileno por ano e de três plantas de polietilenos (duas de PEAD - Polietileno de Alta Densidade – e uma de PEBD - Polietileno de Baixa Densidade). A área total aproximada ocupada pelo Projeto Etileno XXI é de 250 hectares, com as edificações industriais concentradas numa área aproximada de 160 hectares.

A construção deste mega complexo petroquímico ficou a cargo da construtora Odebrecht e os projetos executivos, multidisciplinares, a cargo das mais renomadas projetistas internacionais, entre elas, a GeoCompany Tecnologia, Engenharia & Meio Ambiente.

O grande desafio geotécnico realizado pela GeoCompany foi desenvolver um projeto executivo de modo a viabilizar que uma região do terreno destinada as unidades de craqueamento de etano (Cracker), que deveriam ser instaladas em fundação direta sob uma região de aterro projetado de 10 metros de altura, apoiado em um pacote de solos moles com espessura superiores a 18 metros e de área superior a 100 000 metros quadrados, sofresse recalques máximos praticamente desprezíveis, da ordem milimétrica, em um tempo médio de construção total de um ano.

REQUISITOS PARA O PROJETO EXECUTIVO

O projeto executivo de melhoramento de solos elaborado pela GeoCompany foi dimensionado de acordo com os requisitos de projeto estabelecidos pela projetista estrutural das obras civis, conforme demonstrado a seguir:

i. Obter plataforma de trabalho estável para suportar as cargas dos equipamentos de construção durante implantação do Projeto Etileno XXI.

ii. Obter, após o término do tratamento de solos, recalques residuais negligenciáveis para a carga do aterro construído.

iii. Atender capacidade de carga para fundações rasas de 50kPa com até 4 metros quadrados (bem como trem tipo máximo) com recalques admissíveis de 25mm.

iv. Manter as elevações das plataformas pré-estabelecidas.

FOTO: ACERVO ODEBRECHT / BERNARDO MONTOYA

CONHECIMENTO DA GEOLOGIA LOCAL

Foram desenvolvidos estudos geológicos e geotécnicos extensos para o conhecimento das camadas de solo locais, bem como seus parâmetros necessários à elaboração do projeto de melhoramento de solos e alteamento dos aterros.

1. Solos moles do Projeto Etileno XXI

Os perfis geológicos e cortes estratigráficos obtidos no local indicaram a sobreposição de quatro unidades geotécnicas principais: lutita moderadamente intemperizada (UG-4), lutita fortemente intemperizada (UG-3), lutita intensamente intemperizada (UG-2) e solo residual (UG-1), à superfície. A resistência à penetração do solo é mínima a nula nas camadas superficiais e em regiões baixas, e ocorre alta resistência à penetração nas camadas menos intemperizada de lutita. O nível d'água se apresentou na camada superficial de solo residual, a poucos metros da superfície. A figura 1 apresenta um exemplo de perfil geológico com a sobreposição das unidades geotécnicas citadas.

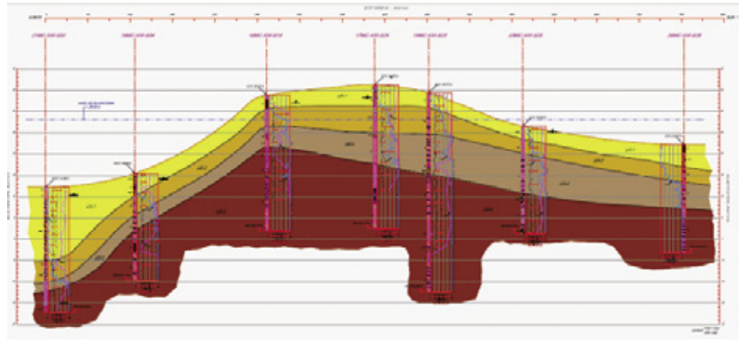


Figura 1 - Detalhe do corte estratigráfico 1-1', Projeto Etileno XXI

Para a elaboração do projeto foi realizada visita técnica à obra e constatou-se que o local da obra apresenta ondulações suaves, atingindo cotas máximas em torno de 50 metros e cotas mínimas em torno de 9 metros, sendo que nas partes altas há solo residual de lutita e nas partes baixas há argilas muito moles a moles, com gênese de alteração de lutita.

A lutita apresenta rocha matriz argilosa, expansiva, com elevada alterabilidade na presença de água. Nos cortes em Lutita Pouco Alterada (UG-1) existe a possibilidade de expansão por alívio de tensões e saturação.

Os locais de argila mole apresentam baixa resistência e elevada compressibilidade, havendo sondagens disponíveis em que o índice SPT obtido é nulo (a haste afunda por peso próprio), e há relatos de caminhão de sondagem ter afundado e atolado nesses locais, observando espessura de solo muito mole de até 8 metros.

2. Levantamento geotécnico de campo

A definição dos parâmetros geológicos e geotécnicos da área de interesse para a definição dos dados de entrada projeto – além de ensaios de laboratório e caracterização completos – foram realizadas sondagens SPT e indicadores do nível da água, necessárias para investigar em profundidade a região, delimitando-a, e para descrever com maior precisão os parâmetros do solo. Também houve ensaios CPTU para uma análise preliminar dos parâmetros de compressibilidade e consolidação das áreas de argila mole. Também foi possível determinar in situ a Resistência Não-Drenada (Su) dos depósitos de argila mole. Esses resultados são apresentados adiante e são necessários para a análise de estabilidade do aterro e das encostas do Etileno XXI.

Para as finalidades de dimensionamento provisório, pois os solos moles sofrerão Melhoramento de Solos por Geodrenos a Vácuo, a camada de solo mole foi considerada homogênea e sua envoltória de resistência favorável à segurança para o comportamen-

Tabela 1 - Avaliação Piezocone da resistência não-drenada (CPTU)

SPC	Depth (m)	C_0 (KP_a)	C_1 (KP_a/m)
202	12,60	20	4,7
203	15,00	13	1,4
204	10,80	10	2,0
205	10,70	61	8,0
207	16,80	15	1,1
208	26,70	14	1,3

to global da camada de solo mole. Pontos de resistência muito acima ou muito abaixo da tendência geral de resistência não drenada do solo foram desprezados, conforme boa prática da engenharia, pois não representam o comportamento global do solo.

Através dos ensaios CPTU realizados, a resistência não drenada das argilas pode ser aferida em função do local e profundidade, ao invés de constante para toda camada de solo mole, conforme Equação 1:

$$S_u = C_0 + C_1.z \qquad \text{(Eq.1)}$$

Onde:
S_u Resistência não drenada;
C_0 Resistência não drenada no topo da camada de argila mole;
C_1 Incremento de resistência ao cisalhamento com a profundidade;
z Profundidade em relação a superfície (m).

Os gráficos de interpretação dos ensaios apresentados no Anexo B - Análise da resistência não drenada pelo CPTU, e seus principais resultados podem ser observados na tabela 1.

É importante notar que a resistência não drenada dos solos moles do Projeto Etileno XXI apresentam parâmetros de mesma ordem de grandeza que os solos moles sedimentares quaternários do litoral brasileiro (especialmente Santos e Rio de Janeiro). A resistência não drenada desses solos é mínima e apresenta riscos de rupturas de deslizamentos caso não sejam respeitados os limites de alteamento de aterro prescritos em projeto.

De forma direta, isso significa que as regiões de grande espessura de solo mole apresentariam patamares intermediários construtivos, com acompanhamento da instrumentação para prosseguir na construção do aterro definitivo e nas plataformas de trabalho necessárias para implementação do projeto Etileno XXI.

3. Parâmetros geotécnicos aferidos

Foram identificados os parâmetros de resistência à penetração simples, estratos de camada de solos, teor de umidade e Limites de Atterberg, granulometria e porcentagem de finos, densidades e pesos específicos, módulo de elasticidade e parâmetros de resistência Mohr-Coulomb.

Para o dimensionamento de aterro sobre os referidos solos moles, foram obtidos parâmetros de compressibilidade, permeabilidade e resistência não drenada após campanha de ensaios Piezocone (CPTU). Os principais parâmetros obtidos são apresentados na tabela 2, de forma comparativa com os parâmetros dos solos moles do litoral brasileiro.

Esses parâmetros geotécnicos foram obtidos e detalhados para dimensionamento e detalhe de engenharia do projeto de Melhoramento de Solos do Etileno XXI, respectivamente:
Compressibilidade - estimativa dos recalques durante período construtivo e após execução da obra;
Permeabilidade - estimativa do tempo de adensamento do solo mole e detalhamento do cronograma de execução dos aterros;
Resistência não drenada - estimativa da resistência do solo mole ao deslizamento, risco evidente nas regiões de maiores espessura de solo mole e maior espessura de aterro.

Tabela 2 - Parâmetros geotécnicos de solos moles comparados (Literatura internacional, experiência prática da GeoCompany e Projeto Etileno XXI)

Parâmetros de Solos Moles				
	Baixada Santista	Rio de Janeiro	México (Geovisa)	México (FEL3)
Prof. (m)	< 50	< 9	< 12	< 17
w (%)	75 - 150	85 -140	20 - 45	29 - 38
LL (%)	40 -150	80 -130	27 -83	35 -80
LP (%)	-	20 - 30	15 - 33	16 - 34
IP (%)	20 - 90	60 - 100	7 - 50	17 - 59
γ_{nat} (kN/m3)	13.5 - 16.3	13.1 - 16.2	17.3 - 19.6	17.3 - 20.0 (19)
e_0	2.0 - 4.0	1.5 - 3.6	0.6 - 0.9 (0.8)	0.7 - 1.3 (0.9)
OCR	1 - 2.5	-	-	1 - 5 (2)
C_v (cm^2/S)	(0.3 - 10) x 10^{-4}	-	(9 - 80) x 10^{-3}	-
C_h (cm^2/S)	-	-	-	(0.5 - 45) x 10^{-4} (1.7 x 10^{-3})
$C_c/(1+e_0)$	0.33 - 0.51 (0.43)	0.23 - 0.61	0.11 - 0.13	0.11
C_r / C_c (%)	8 - 12	3 - 13	14 - 23	22.5
S_u (kPa)	10 - 60	6 - 13	20	15 - 25
C_a (%)	3 - 6	-	-	-

SOLUÇÃO ADOTADA: GEODRENOS A VÁCUO

Através da avaliação geotécnica do levantamento realizado no Projeto Etileno XXI, os geodrenos a vácuo foram a melhor solução em termos técnicos e econômicos para este tratamento de solo mole. O dimensionamento realizado estimou – e posteriormente isso foi confirmado – que essa técnica demandaria cerca de 4,5 meses de consolidação e recalque máximo de 0,97 metro durante a construção das áreas de depósitos de argila mole com maior espessura.

A baixa permeabilidade dos solos moles do Etileno XXI requereu uma sobrecarga adicional para consolidações, o que é mais econômico através de geodrenos a vácuo do que de sobrecarga regular de solo, dadas as grandes áreas envolvidas.

Estes consistiram na inserção de Drenos Verticais Pré-fabricados feitos de material plástico flexível, cobertos com geotêxtil drenante associados à aplicação a vácuo. Tais drenos são inseridos verticalmente no terreno, com a ajuda de mandril de aço, cujas seções geralmente são retangulares. Eles podem ser inseridos em solos extremamente moles, em profundidade de mais de 35 metros, dependendo dos equipamentos disponíveis no local.

Os canos liberam a carga em um coletor conectado a um sistema a vácuo. Valas são escavadas no perímetro do aterro, de modo que sua base esteja localizada abaixo do nível da água. Em condições ideais é possível induzir a sucção na ordem de 70kPa em solo mole, o que corresponde à aplicação de uma altura de aterro equivalente da ordem de 4 metros, sem riscos de deslizamentos. É desejável aplicar um preenchimento de sobrecarga, de modo que a depressão de recalques seja preenchida, além de evitar um retorno a níveis de tensão muito baixos.

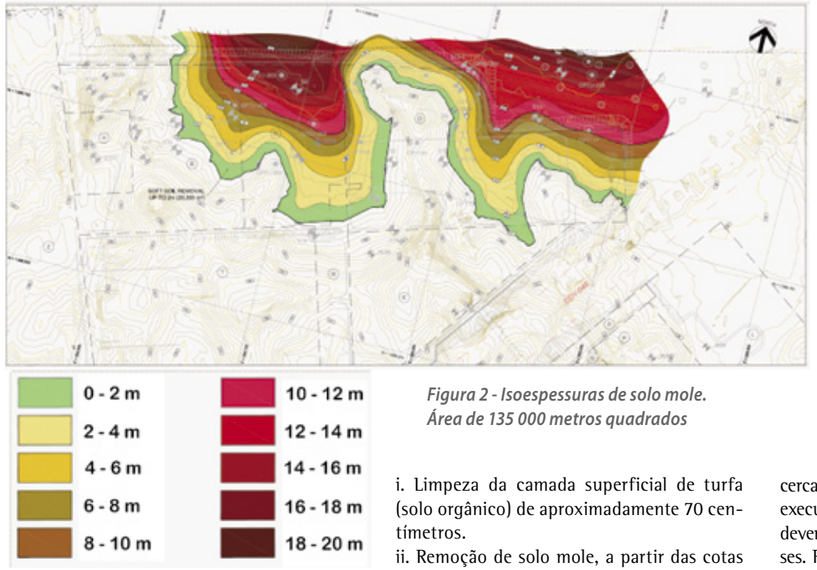


Figura 2 - Isoespessuras de solo mole. Área de 135 000 metros quadrados

Os geodrenos a vácuo demandam uma instrumentação própria da construção do aterro para deformação, poropressão e outras análises de desvios que possam autorizar procedimentos com a construção do aterro depois de cada etapa de consolidação.

1. Critérios de projeto para melhoramento de solos

A unidade de Craqueamento Térmico de Etano está situada sobre um grande depósito de solos moles, ao norte da planta do Projeto Etileno XXI. Sua área se estende por mais de 100 000 metros quadrados, em profundidades de até 20 metros, conforme ilustrado na figura 2, representada a partir dos estudos geológicos e geotécnicos.

Esses grandes volumes de solos moles apresentam diversas dificuldades construtivas. O Detalhe de Engenharia de Melhoramento de Solos adota os parâmetros geológicos e geotécnicos locais, obtidos em ensaios de campo e laboratório.

A sequência construtiva de projeto foi constituída de:

i. Limpeza da camada superficial de turfa (solo orgânico) de aproximadamente 70 centímetros.
ii. Remoção de solo mole, a partir das cotas mais elevadas, a até 2 metros.
iii. Implantação de aterro de conquista, reforçado com geogrelha, para passagem segura do equipamento de cravação/ instalação dos geodrenos a vácuo (*figura 3*).
iv. Cravação dos geodrenos a vácuo em toda área conforme malhas indicadas.
v. Instalação da instrumentação geotécnica para construção segura e acompanhamento do adensamento do solo mole.
vi. Instalação dos sistemas de vácuo e construção do aterro até a primeira fase – até 4 metros de aterro (*figura 4*).
vii. Monitoração da instrumentação até consolidação da primeira fase.
viii. Construção do aterro até a segunda fase – construção final do aterro (*figura 4*).
ix. Monitoração da instrumentação até consolidação da segunda fase.
x. Correções de greide após término da segunda fase.

As figuras 3 e 4 ilustram as fases de construção do aterro.

A construção do aterro em etapas intermediárias cria plataformas de trabalho que atuam como berma de equilíbrio e garantem a estabilidade global dos aterros construídos, desde que sejam respeitadas as alturas de alteamento de projeto.

A sobrecarga equivalente à aplicação do vácuo nos geodrenos é adotada em 50 kPa para as malhas superior e intermediária e de 70 kPa na malha inferior. Cada conjunto de vácuo será conectado a 500 geodrenos nas malhas superior e intermediária e 300 geodrenos na malha inferior, próxima ao limite inferior do terreno.

Por conta do curto cronograma e do forte e severo intemperismo local, com furacões e período de chuvas de cerca de seis meses por ano, toda a elaboração e execução do projeto de melhoramento dos solos deveria ser realizado em um prazo de sete meses. Por conta disso, o projeto foi rapidamente desenvolvido, definindo os tratamentos:
Região alta: # 1,10 m x 1,10 m - Conjuntos de vácuo operando somente durante primeira fase (calculado em 2,2 meses).
Região intermediária: # 1,50 m x 1,50 m - Conjuntos de vácuo operando durante primeira fase e segunda fase (calculado em 2,2 meses).
Região inferior: # 1,40 m x 1,40 m - Conjuntos de vácuo operando durante a primeira fase e segunda fase (calculado em 4,5 meses).

O tempo total de adensamento (primeira e segunda fases) foi estimado em 4,5 meses, com período de uma semana para construção de cada etapa.

a) Tempo de adensamento

A sequência construtiva é constituída de duas fases de adensamento principais. As etapas de adensamento são iniciadas a partir do início da operação dos geodrenos a vácuo, pois o vácuo é equivalente à pressão de até 2,50 metros de aterro sobre os solos

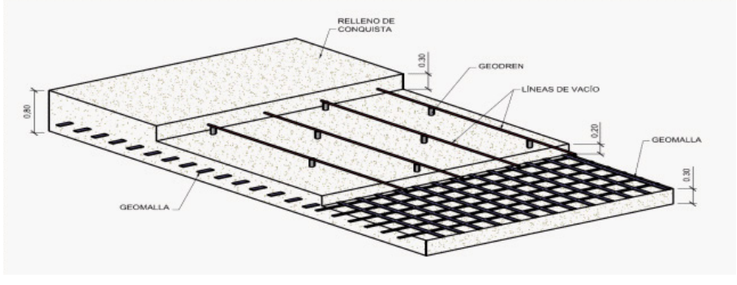


Figura 3 - Geometria do aterro de conquista, com geogrelha, geodrenos e linhas de vácuo incorporados

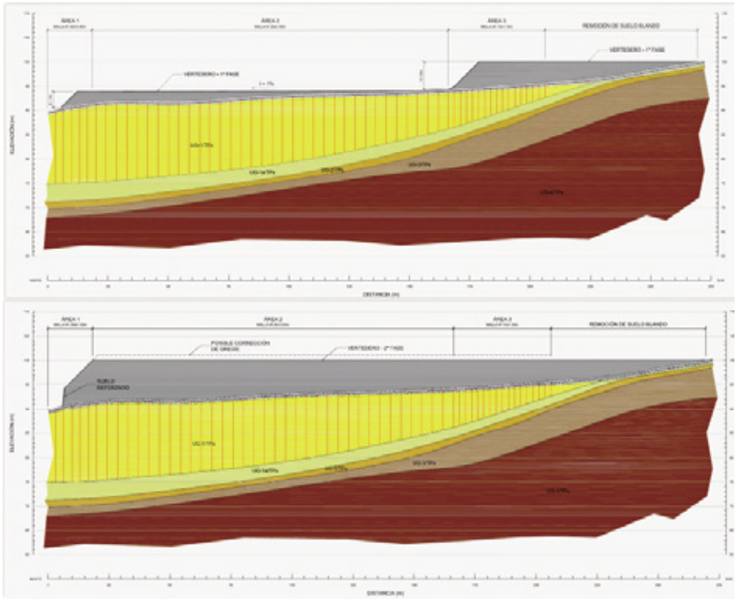


Figura 4 - Etapas de instalação de geodrenos a vácuo
1ª Fase - aterros de até 5 metros nas áreas altas e até 4 metros nas áreas inferiores
2ª Fase - aterro em cota final para todas as áreas

moles (ou 50kPa de sobrecarga).
Primeira fase - Adensamento completo da malha superior, adensamento parcial das malhas intermediária e inferior. Tempo previsto: 2,2 meses.
Segunda fase - Adensamento completo das malhas intermediária e inferior. Tempo previsto: 2,3 meses.
Melhoramento de solos total - Tempo previsto: 4,5 meses.

As etapas de adensamento serão liberadas conforme acompanhamento da instrumentação pela GeoCompany.

b) Previsão de recalques

As etapas construtivas realizaram consolidação dos solos moles através de adensamento. Dessa forma, a previsão de recalques durante os períodos construtivos foram cumpridas, conforme apresentado a seguir:
Malha superior: recalque total de até 0,23 metro para espessura de solo mole de até 3 metros e altura de aterro de até 3,0 metros;
Malha intermediária: recalque total de até 0,71 metro para espessura de solo mole de até 11 metros e altura de aterro de até 7,0 metros;
Malha inferior: recalque total de até 1,06 metro para espessura de solo mole de até 17,5 metros e altura de aterro de até 10,0 metros.

Os recalques serão compensados na etapa final com a correção do greide após consolidação completa dos solos moles do projeto Etileno XXI.

As etapas de adensamento foram liberadas conforme acompanhamento da instrumentação pela GeoCompany.

FOTOS GERAIS DO EMPREENDIMENTO

Apresentam-se a seguir algumas fotos do empreendimento, ilustrando a topografia e dimensões da área de melhoramento de solos, bem como ilustrando o conjunto de bombas de vácuo e sistemas de geodrenos em processos de execução e atuação.

Apresentam-se também fotos das instalações de instrumentação, como piezômetros de corda vibrante, tassômetro, e banco de nível.

INTRUMENTAÇÃO E SEGURANÇA

Como em todo projeto de tratamento de solos moles e alteamento de aterros de elevada altura e responsabilidade, para receber estruturas industriais de elevado risco, a instrumentação da obra foi fundamental e decisiva para a segurança (estabilidade) e o monitoramento do adensamento de projeto, de modo a condicionar a liberação das etapas construtivas da obra.

Resumidamente, são cinco os principais objetivos da instrumentação:
1) Acompanhar os recalques e alertar em caso de risco.
2) Monitorar pressões neutras geradas durante a construção e sua velocidade de dissipação.
3) Acompanhar os efeitos de deslocamentos horizontais provocados por um aterro sobre solo mole.
4) Monitorar a estabilidade da obra em casos críticos.
5) Verificar a adequação de um método construtivo.

A instrumentação nesta obra foi fundamental para o acompanhamento dos benchmarks do projeto ao longo da obra, além de verificar sua eficiência ao longo da grande área de atuação. Para tanto foram instalados e monitorados:
Marcos superficiais para medição dos recalques em superfície;
Tassômetros para medição dos recalques e adensamento dos solos moles em profundidade;
Piezômetros para acompanhamento da pressão da água e grau de adensamento dos solos moles;
Inclinômetros para monitoração dos movimentos e tendências de instabilidade do aterro.

A liberação do avanço dos aterros, por meio da instrumentação, foi condicionada em:
- Acompanhamento da instrumentação geotécnica para análise da dissipação da pressão neutra nas camadas de solos moles (por piezômetros), garantia da estabilidade global da construção (tassômetros, pinos de recalque e inclinômetros).
- Resistência das camadas inferiores (ensaios de resistência de campo como Ensaio de Palheta - Vane Test e ensaio de piezocone CPTU).

CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES FINAIS

O tratamento de solos foi executado com uma técnica inovadora: drenos a vácuo, onde o vácuo funciona tanto como sobrecarga, como também aumentando a capacidade de drenagem do sistema. E a trajetória de tensões resultante da aplicação destes esforços favorece também a estabilidade dos aterros sobre solos moles durante o período construtivo.

O sistema de melhoramento de solos com drenos a vácuo foi dimensionado para desenvolver os recalques primários (adensamento) e secundários durante o tempo de construção dos aterros, minimizando recalques de longo prazo.

O sucesso desta etapa do empreendimento conclui-se com os aterros sendo executados em um período de cinco meses. Em suma, em um prazo inferior a um ano houve a elaboração do projeto e a execução, monitoração e liberação da área da plataforma de craqueamento térmico deste empreendimento.

A instrumentação projetada e aplicada durante a etapa construtiva, além de liberar as etapas de alteamento dos drenos e aterros de modo dinâmico e seguro, foram fundamentais para o controle da segurança, pelo monitoramento da estabilidade da obra ao longo das etapas construtivas.

Por conta disso, pode-se concluir que o sucesso do empreendimento de grande porte foi total.

Este sucesso somente foi possibilitado pelo forte alinhamento de conceitos, metas e ações do empreendedor (Braskem) e do construtor (Odebrecht), pois foi realizado em locais dentro das áreas industriais do empreendimento, com rochas expansivas (lodolitas) e solos moles, originários de alteração e intemperização daquelas rochas expansivas.

O movimento de terra foi realizado também em um prazo curtíssimo, considerando que o sítio vive sob o regime de chuvas intensas e está permanentemente sujeito a fatores de risco imprevisíveis, tais como furacões, terremotos e greves (todos potencialmente negativos para o cronograma de obras).

Com os estudos realizados, foi feita a opção de DVP (Drenos Verticais Profundos), com aplicação de vácuo para a aceleração dos recalques.

Esta alternativa revelou-se a mais rápida (cada dreno poderia ser cravado e instalado em menos de dez minutos) e mais econômica (cerca de cinco vezes mais barata que colunas de brita e dez vezes mais barata que o uso de Jet Grout, numa área de aproximadamente 100 000 metros quadrados).

O trabalho atendeu, portanto, aos requisitos de cronograma e de economia, superando desafios inéditos para a GeoCompany, como a necessidade de implantar e iniciar a operação dos drenos a vácuo em prazo inferior a dois meses, e de acelerar os recalques para que eles ocorressem segundo o cronograma da fase de construção. Foi mais uma vitória da engenharia e da geotecnia.

A seguir apresentam-se algumas quantidades utilizadas para o dimensionamento dos geodrenos a vácuo, para o Melhoramento de Solos:
Geodrenos a vácuo – 465 696 metros.
Operação de sistemas a vácuo – 4,5 meses.
Areia A-2-4 para Aterro de Conquista – 86 077 metros cúbicos.
Geogrelha com resistência a tração radial > 475 kN/m – 127 160 metros quadrados.

Vista geral da área sob tratamento

Detalhe da malha de drenos e sistema de captação de vácuo

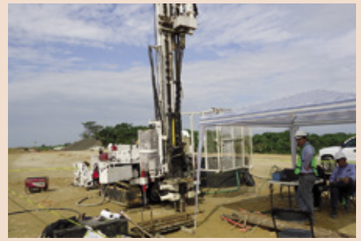
Instalação de drenos e malha de vácuo

Detalhe dos drenos

Bombas de vácuo na cota inferior e alteamento do aterro em evolução

Detalhe do sistema de bombeamento de vácuo e alteamento do aterro

Instalação do Tassômetro 20



Perfuração para instalação do piezômetro de corda vibrante

Piezômetros e Referências de Nível 7A e 7B

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] KOCHEN, ROBERTO – 2013 - Engenharia brasileira participa de magaprojeto em Vera Cruz, no México. REVISTA ENGENHARIA, edição 614/2013.

** **Roberto Kochen** é engenheiro, diretor do Departamento de Infraestrutura do Instituto de Engenharia, diretor técnico da GeoCompany Tecnologia, Engenharia & Meio Ambiente, e professor doutor da Escola Politécnica da USP*
E-mail: kochen@geocompany.com.br
*** **Habib Georges Jarrouge Neto** é engenheiro, gerente da GeoCompany Tecnologia, Engenharia & Meio Ambiente*
**** **Izabel Gomes Bastos** é engenheira, Msc., gerente da GeoCompany Tecnologia, Engenharia & Meio Ambiente*
***** **Renato Araujo** é engenheiro, Msc., gerente da GeoCompany Tecnologia, Engenharia & Meio Ambiente*