

O enrijecimento do solo de fundação da zona portuária de Manaus, 5 anos após a tragédia de 2010

Joaquim Rodrigues

Engenraut Geotecnia e Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, joaquim@engenraut.com.br

RESUMO: As condições do solo de fundação, com fortes características geotécnicas de antigas rupturas pouco conhecidas, e a heterogeneidade dos aterros superpostos, ao longo de décadas, tornam crítico o cíclico fenômeno do rápido esvaziamento do Rio Negro, nesta região pois, perde-se o efeito estabilizante da água em toda a margem portuária, com o agravante do aumento da poropressão no solo, junto a antigas superfícies de ruptura. Como resultado, a estabilidade da margem portuária é dramaticamente reduzida. O maior acidente portuário do norte do país ocorreu na manhã de domingo, no dia 17 de outubro de 2010. O tempo estava bom e o Rio Negro estava em plena vazante, com nível de 14,71m. Veio a tragédia, caracterizada pela ruptura de extensa margem portuária, então sustentada por muros de contenção, com cerca de 6m de altura, que não suportaram a carga ali presente, deslizando com seus aterros, contêineres, guindastes, veículos e vidas humanas. A ruptura ocorreu formando uma superfície semi-circular, de ruptura rotacional, com cerca de 100m de raio. A presença de fontes e vertentes d'água na base da margem portuária, além dos fatores condicionantes já citados, também indicavam a ocorrência de erosão subterrânea retrogressiva, colaborando para o grande quadro de ruptura. As autoridades portuárias optaram pelo CPR Grouting, pelo fato de que enrijece drasticamente as características do solo, de todo o solo, aumentando sua resistência e, principalmente, neutralizando o efeito do excesso de poropressão durante a vazante do Rio Negro. O objetivo deste trabalho é apresentar um resumo das características do solo enrijecido, no que tange à rigidez e a resistência cisalhante do solo, estabelecendo-se sua lei comportamental através da relação tensão-deformação, através de análises pressiométricas realizadas, na condição pré e pós tratamento do solo, considerando-se que a deformação do solo é extremamente dependente de sua rigidez.

PALAVRAS-CHAVE: Solo mole, tratamento geotécnico, rápido esvaziamento, pressiómetro, terras caídas, consolidação.

1 INTRODUÇÃO

A vocação natural da Amazônia, no que se refere a modal de transporte é, sem dúvida, a forma hidroviária, no entanto, a condição geotécnica da incomparável Zona Portuária de Manaus, submetida ao cíclico e inigualável fenômeno do rápido esvaziamento das águas do Rio Negro, com cerca de 15m de altura, em 6 meses, estabelece desafios enormes para manter esta obstinada capacidade.

Este trabalho procura evidenciar que a ocorrência dos deslizamentos/rupturas, figura 2 e 3, nos aterros da zona portuária de Manaus, além

da maior ocorrência em outubro de 2010, tem sua história exatamente pela frequência com que ocorrem. Não há nenhum mecanismo de resposta e acompanhamento sistemático deste sério problema, que identifique cada situação e suas particularidades geológicas/geotécnicas. Um detalhe importante neste contexto é que, pela extensão dos problemas e a grandeza da região sintomática, abrangendo todos os portos da Amazônia, somente os casos catastróficos chegam a opinião pública brasileira, mascarando o sério problema, cujas intervenções impactam, sobremaneira sua população.

A opção por métodos de tratamento com base em estacas, ou mesmo colunas, que transferem cargas, tornou-se um problema, frente ao dramático excesso de poropressão desenvolvido nos aterros, tornando o solo de fundação extremamente perigoso na vazante do Rio Negro, o que justifica o trágico fenômeno das "terras caídas" da Amazônia. A solução, portanto, deveria privilegiar o aspecto geotécnico, significando uma modificação das características do solo, de modo a impedir o efeito do excesso de poropressão nos aterros, durante a vazante do Rio Negro, neutralizando tensões horizontais no cais portuário. O CPR Grouting tem esta performance, já que à medida em que consolida o solo argiloso, promove seu enrijecimento, modificando sua performance, tornando-o apto para suportar o cíclico fenômeno do rápido esvaziamento do Rio, em cerca de 15m em 6 meses.

A sistemática de funcionamento do CPR Grouting utiliza conceitos de expansão de cavidades, através da formação de bulbos de compressão com geogROUT, em meio drenante artificial, o que comprime e confina o solo argiloso adensando-o, ao mesmo tempo em que promove seu enrijecimento, pelo modelo de solo homogêneo equivalente. Caracteriza-se por sua altíssima eficiência de 95%, modificando enormemente a capacidade suporte de solos moles argilosos. É utilizado, com frequência, em áreas portuárias. Toda a extensão portuária, após outubro de 2010, foi motivo de várias campanhas de sondagens geotécnicas com pressiómetro, dando como características variações de areia argilosa e argila muito mole, apresentando variações típicas de 2 a 15 golpes até cerca de 30m de profundidade. Por ser um teste em que privilegia a deformação, ao contrário dos testes de penetração com SPT, CPT e Palheta, que distinguem-se pela ruptura, o ensaio pressiométrico possui uma sonda cilíndrica inflável, que se posiciona a todas as profundidades desejadas e, como o CPR Grouting, faz uso da teoria de expansão de cavidades para análise. Desta forma, consegue examinar todas as características do solo original, além de todo o contexto da célula unitária do solo homogêneo, produto final do CPR Grouting. A distribuição dos ensaios de certificação do solo, variou de acordo com o

tamanho das áreas tratadas. O resumo dos ensaios pressiométricos indicou um aumento significativo da rigidez do solo, assim como de sua resistência ao cisalhamento. Análises piezométricas complementares (figura 1) posicionaram para a ausência de excessos de poropressão, após o tratamento, inclusive durante e após a vazante do Rio Negro.

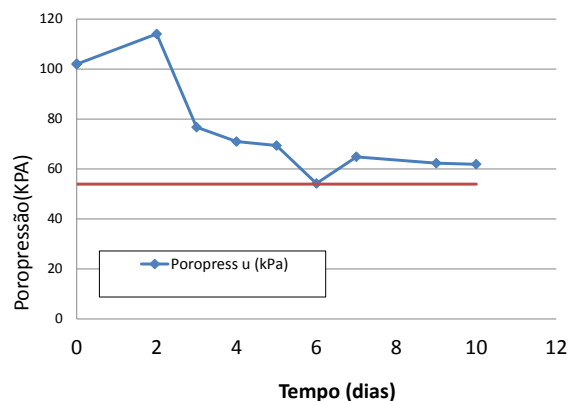


Figura 1. Análise piezométrica durante a execução dos bulbos de compressão do solo.



Figura 2. Situação de ruptura típica da região portuária de Manaus.



Figura 3. Processo de ruptura, na região portuária, com perda considerável de bens e até vidas.

O CPR Grouting é a única tecnologia de enrijecimento de solos argilosos hoje no Brasil, extremamente rápida em sua execução, particularmente para estradas, aeroportos, ferrovias, áreas portuárias e industriais.

2 CONDIÇÕES DO SOLO NA ÁREA PORTUÁRIA

Toda a extensão portuária foi motivo de várias campanhas de sondagens SPT, que deu como característica variações de areia argilosa ou argila muito mole, variando de 2 a 15 golpes, com camadas resistentes de argila / areia média e grossa argilosa até 30m de profundidade. A figura 4 apresenta sondagens típicas do tipo de solo apresentado na região portuária analisada.

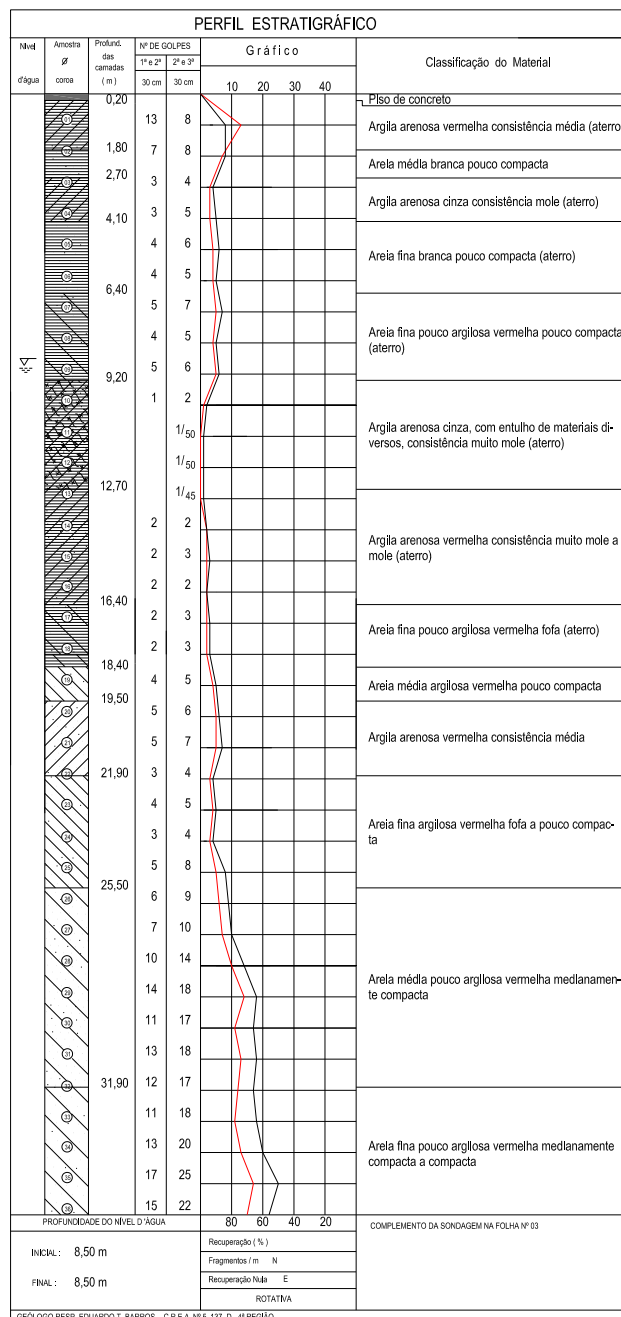


Figura 4. Sondagem SPT, que caracteriza o solo de fundação da região portuária de Manaus.

De forma característica, em toda a extensão da área portuária, há predominância de cerca de 3 a 7m de aterro com pedregulhos, restos de construção, etc. Nas regiões planas, pavimento de concreto executado sobre camada de base de brita e sub-base de rachão com cerca de 1m de espessura. Nas regiões de taludes e ribeirinhas, denominadas "praias", há presença de aterro arenoso com restos de construção. Não há maiores informações sobre as propriedades geotécnicas do solo mole.

A resistência ao cisalhamento original não drenada, ao longo dos 30m de profundidade, obtida com sondagens pressiométricas, variava de 2kPa a 20kPa. O nível do Rio Negro, apresenta variação de vasante de cerca de 15m, entre os meses de junho a novembro e, de forma característica, as rupturas ocorrem nos meses de setembro e outubro, caracterizando o conhecido fenômeno das terras caídas.

3 A CAUSA DE TODO O PROBLEMA: O ENORME EXCESSO DA POROPRESSÃO NOS ATERROS DEVIDO AO RÁPIDO ESVAZIAMENTO DO RIO NEGRO

O fenômeno do rápido esvaziamento, crítico nesta região portuária do Amazonas, e causa de todos os problemas de ruptura, se apresenta de 3 maneiras distintas, conforme condições climáticas e a condição do solo nas regiões ribeirinhas (figura 5):

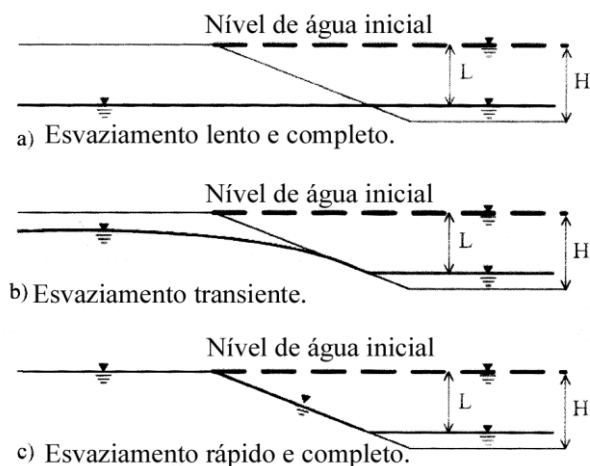


Figura 5. As três modalidades de esvaziamento do Rio Negro ao longo da região portuária, de acordo com o tipo de aterro empregado.

Na condição lento e completo, a situação do fluxo e da poropressão ficam ambas equilibradas (condição hidrostática). Na condição rápido e completo o solo, tipicamente aterros argilosos compactados, funciona como não drenado, o NA permanece na condição inicial superior, em grande parte do período de esvaziamento. Para a condição transiente, a superfície do NA é curvilínea dentro do maciço, dependente da velocidade de esvaziamento do Rio Negro e, principalmente das propriedades do solo (aterro), assim como sua condutividade hidráulica, porosidade, etc. Consequentemente, a poropressão remanescente no maciço é do tipo transiente, ou seja, varia com o tempo e com a capacidade dos aterros reterem a água.

O fenômeno do rápido esvaziamento do Rio Negro, descendo cerca de 15m de altura em apenas 6 meses, talvez seja a mais severa condição a que um talude pode se submeter, razão do conhecido fenômeno das "terras caídas" em toda a região amazônica. Durante o esvaziamento rápido do Rio Negro, que pode chegar a cerca de 15cm por dia, perde-se o efeito estabilizante da água na região superior dos taludes e piers das áreas portuárias, permanecendo alta a poropressão no interior dos maciços portuários. O resultado é a redução da estabilidade desses maciços e taludes, seguido de processos de ruptura.

A variação das características do aterro, ao longo dos anos em toda a extensão portuária, é crítica e influencia enormemente a dissipação da poropressão. Aterros arenosos drenam rápido durante o esvaziamento do Rio, já aterros argilosos confinam a água, fazendo com que a descida da superfície piezométrica não acompanhe a do nível da água livre do Rio, causando rupturas repentinas de toda a massa de aterros, taludes e "praias" da região portuária. A figura 6 mostra a situação de cheia em aterros argilosos. Já, na figura 7, é mostrada a execução do CPR Grouting.

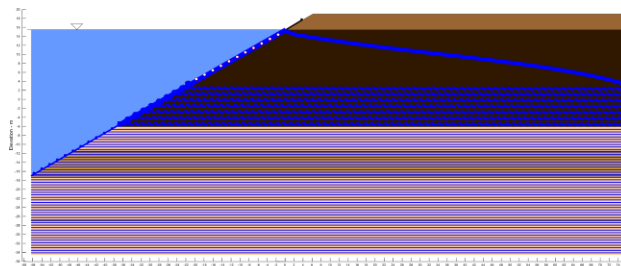


Figura 6. Nível piezométrico alto quando da cheia do Rio Negro.

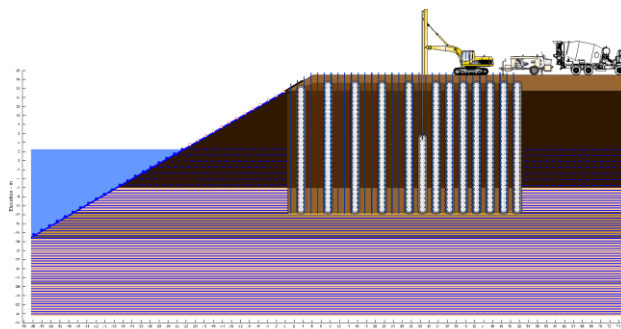


Figura 7. Os serviços de enrijecimento do solo neutralizam a compressibilidade e a ação piezométrica, restituindo a segurança necessária.

4 O PROJETO DO CPR GROUTING

O histórico de rupturas e deformações, associado ao risco permanente de instabilidade na região portuária de Manaus exige serviços de consolidação associado ao enrijecimento do solo, caracterizado pelo CPR Grouting, mostrado na figura 8.



Figura 8. Panorama dos serviços CPR Grouting na Zona Portuária, pós-ruptura.

Na figura 9, apresenta-se um detalhe do projeto.

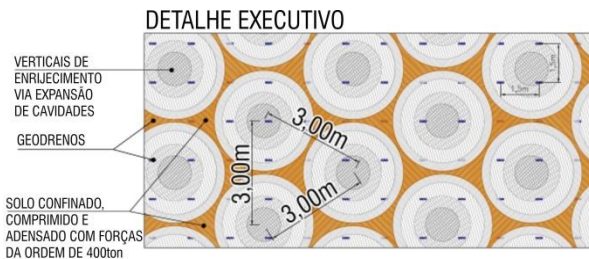


Figura 9. Detalhamento básico do enrijecimento do solo na Zona Portuária, com CPR Grouting.

O projeto CPR desenvolvido teve como base os seguintes parâmetros:

- Acesso as propriedades e o comportamento geomecânico da área portuária (sondagens pressiométricas).
- O mecanismo e a tipologia do histórico de rupturas, incluindo a velocidade, as direções dos movimentos e as geometrias das rupturas.
- Os fatores geológicos, hidrológicos, a magnitude e as dimensões influentes na instabilidade da região, e que motivavam os permanentes estados de ruptura.
- Os níveis freáticos, as pressões da água na extensão em questão, além da permeabilidade através das sondagens SPT existentes.
- Os fatores ambientais e o histórico da ação humana no local.
- A premência da intervenção.
- A futura modificação da geometria dos taludes e o processo de drenagem consequente.

As figuras 10, 11 e 12 apresentam a sequência de serviços realizados com CPR Grouting

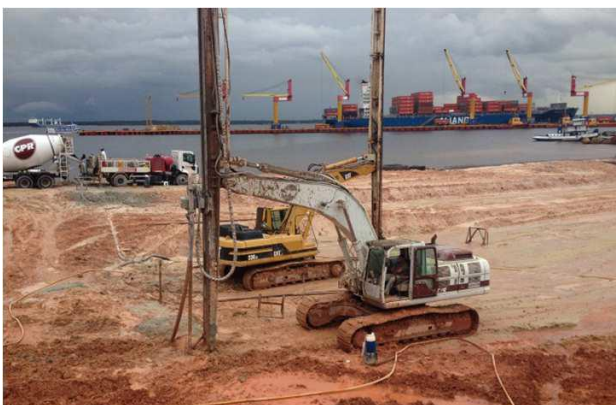
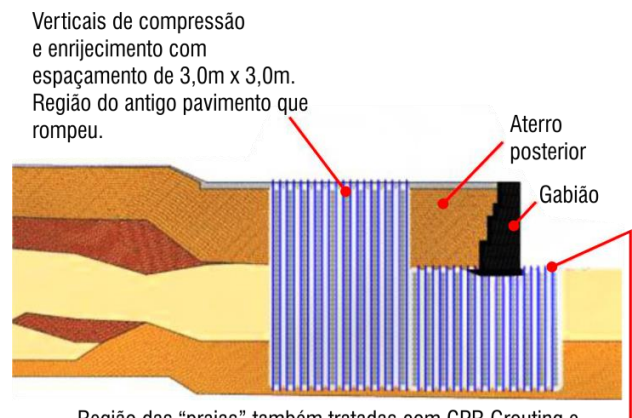


Figura 9. Trabalhos de pré-furo, com ar comprimido, até a profundidade de 30m, seguido da posterior formação de bulbos de compressão do solo de modo a adensá-lo e enrijecê-lo.



Figura 10. Área portuária tratada com CPR Grouting e com muro gabião com cerca de 8m de altura definindo o novo cais. Notar que o nível do rio está em sua cota máxima e o aterro apenas aguardando a base granular para assentamento do piso de concreto. Ver detalhe do projeto na figura 10.

A malha de geodrenos para o CPR Grouting projetada foi de 1,50m x 1,50m em triângulo e a malha de verticais com bulbos de compressão e adensamento, de 3m x 3m, também em triângulo. Como pode-se observar, pelo projeto abaixo (figura 12), o CPR Grouting abrange a retroárea portuária além da região das praias, onde é erguido, a seguir, o muro que compõe o novo cais.



Região das "praias" também tratadas com CPR Grouting e recebendo muro gabião que define o novo cais.

Figura 11. Projeto básico de enrijecimento do solo de fundação, com CPR Grouting, na Zona Portuária, abrangendo 2 etapas para o enrijecimento do solo, sendo que a segunda serve de suporte a um muro de contenção com cerca de 8m de altura.

5 A CERTIFICAÇÃO DOS SERVIÇOS DE CPR GROUTING

O modelo CPR Grouting (figura 13) pode ser explicado por sua célula unitária composta por quatro bulbos de compressão no solo, realizados

via expansão de cavidades, que acabam por isolar um bulbo de solo em seu centro, comprimindo-o, confinando-o e consolidando-o, tornando-o um conjunto homogêneo com rigidez própria de um solo compacto e duro (figura 14).

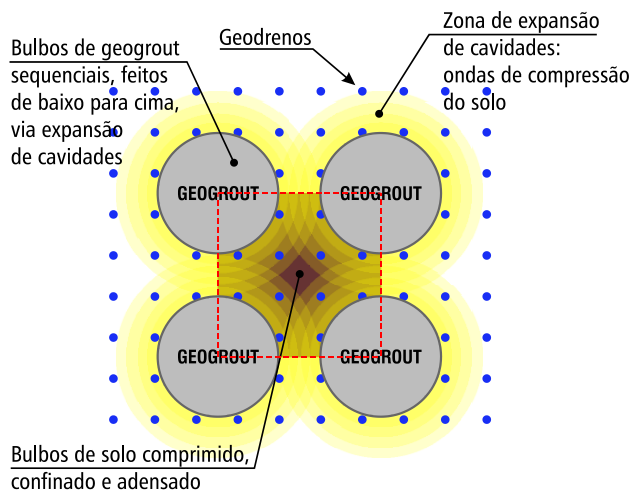


Figura 12. Célula unitária representativa do CPR Grouting (Almeida e Marques, 2010), que restabelece um único nível de rigidez para o solo.

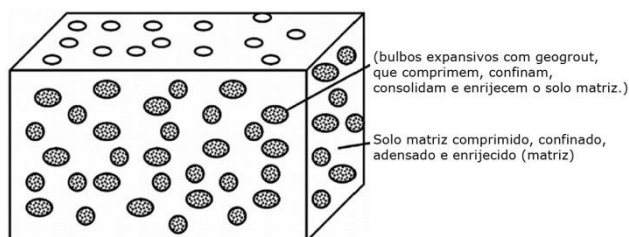


Figura 13. Modelo de solo homogeneizado. Os bulbos de compressão do solo feitos com geogROUT, funcionam como um sistema expensor, via expansão de cavidades, disperso dentro da matriz. Numa escala macro, é considerado como solo homogeneizado. Adaptado de Wang et al. (2002).

Desta forma, naturalmente, torna-se obrigatório analisar esta célula através de testes que privilegiem a deformação e não a ruptura, com ensaios pressiométricos, que possibilitem analisar todo o contexto da célula unitária, ou seja, o solo homogeneizado, através da mesma teoria da expansão de cavidades. Equivocadamente, ensaios tipo SPT e CPT, que privilegiam a ruptura, não conseguem analisar de maneira representativa e completa a célula unitária do CPR Grouting, mas apenas o solo matriz. A presença de material argiloso/siltoso afeta a investigação do grau de enrijecimento obtido, particularmente com relação a

resistência de ponta do CPT, que é relativamente insensível como medidor de incrementos de resistência e rigidez, quando da melhoria de solos, conforme pesquisa de Campanella et al (1982).

Desta forma, todo o serviço CPR Grouting é aferido antes e depois com análises pressiométricas que, basicamente, utiliza sonda cilíndrica inflável, posicionada a diversas profundidades. O pressiômetro utiliza unidade de controle hidráulico para carregar a sonda, monitorando a resposta do solo na profundidade ensaiada. A figura 15 mostra essas análises sendo executadas.



Figura 14. Análise pressiométrica executada na área pavimentada da Zona Portuária.

Os dados coletados de cada ensaio são utilizados para determinar a pressão limite, que calcula a capacidade de carga do solo e o módulo pressiométrico, que informa o nível de rigidez obtido, além da resistência ao cisalhamento. Piezômetros de cordas vibrantes, instalados na área portuária, monitoram o excesso de poropressão, parâmetro crítico durante o processo de formação dos bulbos de compressão do solo, informando o processo de excesso e dissipação da poropressão.

Todas as áreas tratadas, bem identificadas, foram submetidas a análises pressiométricas antes e após o enrijecimento do solo de maneira a certificá-las. A distribuição dos ensaios varia de acordo com o tamanho da área, obedecendo-

se diretrizes normativas inerentes. Os resultados, apresentados na tabela 1, dão uma ideia exata da situação do solo na condição original e do nível de enrijecimento imposto, ao longo de toda a profundidade tratada, onde se observam mudanças de densidade e do regime de tensões, que interferem e alteram o histórico das camadas de solo pouco competentes.

Os ensaios pressiométricos indicam o aumento significativo da rigidez do solo, assim como sua resistência ao cisalhamento. Jamiolkowski e Pasqualini (1992) informam que a rigidez obtida em solos homogeneizados incide diretamente no grau de sobreadensamento, mais do que qualquer aumento de densidade. A instalação de inclinômetros e placas de recalques em toda região portuária tratada, nestes quatro anos, posicionam pelo total sucesso no enrijecimento do solo com CPR Grouting. A tabela 2 apresenta valores de referência de pressão limite e módulo de elasticidade de acordo com a classificação do solo.

Tabela 1. Resultados de Ensaio Pressiométricos: planilha com valores pressiométricos típicos ob-tidos pré e pós CPR.

	Ensaio	Prof (m)	Solo	G (kPa)	Su (kPa)
nov/15	PMT01_Pré	5	areia	1.125,0	desp.
	PMT01_Pré	10	argila	437,5	12,17
	PMT01_Pré	15	argila	656,3	16,50
	PMT01_Pré	20	argila	892,9	20,79
	PMT02_Pré	5	areia	1.087,5	desp.
	PMT02_Pré	10	argila	491,1	13,28
	PMT02_Pré	15	argila	647,3	16,33
	PMT02_Pré	20	argila	901,8	20,94
	PMT03_Pós	5	areia	5.303,6	desp.
	PMT03_Pós	10	argila	2.812,5	42,87
	PMT03_Pós	15	argila	3.653,6	52,16
	PMT03_Pós	20	argila	7.293,5	84,96
	PMT04_Pós	5	areia	7.875,0	desp.
	PMT04_Pós	10	argila	2.850,0	43,30
	PMT04_Pós	15	argila	3.798,2	53,70
	PMT04_Pós	20	argila	8.292,4	93,55

dez/15	PMT05_Pré	5	areia	1.112,5	desp.
	PMT05_Pré	10	argila	437,5	12,17
	PMT05_Pré	15	argila	633,9	16,08
	PMT05_Pré	20	argila	843,8	19,92
	PMT06_Pré	5	areia	1.050,0	desp.
	PMT06_Pré	10	argila	433,0	12,08
	PMT06_Pré	15	argila	633,9	16,08
	PMT06_Pré	20	argila	825,9	19,61
	PMT07_Pós	5	areia	7.785,0	desp.
	PMT07_Pós	10	argila	3.241,1	47,68
	PMT07_Pós	15	argila	3.332,1	48,68
	PMT07_Pós	20	argila	7.254,5	84,62
	PMT08_Pós	5	areia	6.750,0	desp.
	PMT08_Pós	10	argila	3.176,8	46,97
	PMT08_Pós	15	argila	3.305,4	48,39
	PMT08_Pós	20	argila	8.565,8	95,85
jan/16	PMT09_Pré	5	areia	1.262,5	desp.
	PMT09_Pré	10	argila	433,0	12,08
	PMT09_Pré	15	argila	656,3	16,50
	PMT09_Pré	20	argila	839,3	19,84
	PMT10_Pré	5	areia	1.230,0	desp.
	PMT10_Pré	10	argila	437,5	12,17
	PMT10_Pré	15	argila	616,1	15,74
	PMT10_Pré	20	argila	852,7	20,08
	PMT11_Pós	5	areia	7.473,2	desp.
	PMT11_Pós	10	argila	3.219,6	47,44
	PMT11_Pós	15	argila	3.717,9	52,85
	PMT11_Pós	20	argila	6.796,9	80,58
	PMT12_Pós	5	areia	6.856,1	desp.
	PMT12_Pós	10	argila	3.519,6	50,72
	PMT12_Pós	15	argila	3.760,7	53,30
	PMT12_Pós	20	argila	8.917,4	98,79

Tabela 2. Tabela de referência (Briaud, 1992).

Tipo de Solo	Pressão limite líquida	Módulo Presiométrico
	P_L^* (kPa)	E_m (kPa)
Mole	0 - 200	0 - 2.500
Média	200 - 400	2.500 - 5.000
Rija	400 - 800	5.000 - 12.000
Muito rija	800 - 1.600	12.000 - 25.000
Dura	> 1.600	> 25.000

	Fofa	0 - 500	0 - 3.500
Argila	Medianamente compacta	500 - 1.500	3.500 - 12.000
	Compacta	1.500 - 2.500	12.000 - 22.500
	Muito compacta	> 2.500	> 22.500

O módulo de elasticidade equivalente (G_{eq}), estabelece relação entre os módulos das verticais do solo consolidado, confinado e comprimido (G_s), e das verticais de Geogrout (G_g). Esta relação é representada por uma média ponderada entre áreas de solo enrijecido e de Geo-grout. A média de resultados obtidos com ensaio pressiométrico foi:

Tabela 3. Módulo Pressiométrico Equivalente:

Módulos (valor médio)	% da Área Unitária (m ²)
$G_{s,antes} = 772,38 \text{ kPa}$	*****
$G_{s,depois} = 5.397,95 \text{ kPa}$	80,3 %
$G_g = 240.000,00 \text{ kPa}$	19,7 %
$G_{eq} =$	100 %

Nota: O valor de G_g é obtido em laboratório, e é padrão do CPR Grouting.

Sendo o módulo equivalente (ver figura 15) representado por:

$G_{eq} = 19,7\% G_g + 80,3\% G_s = \mathbf{51.614,6kPa}$
equivalente a uma argila dura.

6 CONCLUSÃO

A zona portuária de Manaus, por sua importância na vida da cidade, tem apresentado situações catastróficas cuja intervenção impacta em sua população. A utilização da técnica de enrijecimento de solos CPR Grouting tem demonstrado, ao longo de quatro anos ininterruptos de atuação, ser completamente eficiente para este grande problema da região e em outros portos da Amazônia. Como a escolha do fator de segurança é vital em qualquer projeto, o conhecimento dos parâmetros de resistência, rigidez, distribuição da poropressão, experiência acumulada com as diversificadas massas de aterro e solo de fundação da crítica zona portuária de Manaus e, por fim, a

experiência adquirida, permitem viabilizar o CPR Grouting como sistemática de intervenção segura, econômica e 100% eficaz para áreas portuárias.

REFERÊNCIAS

- Almeida, M. S. S. e Marques, M. E. S. (2010). *Aterros Sobre Solos Moles – Projeto de Desempenho*. Ed. Oficina de Textos
- Briaud, J. L. (1992). *The Pressurometer*. Published by: Taylor and Francis/Balkema. p.50.
- Jamiolkowski, M., Pasqualini, E. (1992) *Compaction of granular soils, remarks on quality control*, V.2, pp. 902-914 et aussi discussion Vol. 3, pp. 85-87, in Grouting, soil improvement and geosynthetics, ASCE, GSP 30, New York.
- Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D., Rice, A. (1986) *Seismic Cpt to Measure in Situ Shear Wave Velocity*. Journal of Geotechnical Engineering 01/1986; 112(8). DOI: 10.1061 / (ASCE) 0733 – 9410 (1986) 112 : 8 (791).