

Avaliação dos parâmetros mecânicos e físicos de solos moles através da injeção de colunas de argamassa associada a geodrenos verticais

Evaluation of the mechanical and physical parameters of soil soils through the injection of grouting columns associated with prefabricated vertical drains

DOI:10.34117/bjdv6n12-740

Recebimento dos originais: 30/11/2020

Aceitação para publicação: 30/12/2020

Rodrigo Rogerio Cerqueira da Silva

Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil
Universidade Nove de Julho, São Paulo, Brasil
Rua Guaranésia, 425 - Vila Maria, São Paulo - SP, 02112-000
E-mail: rodrigorogério@uni9.pro.br

Maeli dos Santos Tavares

Pós Graduanda em Geotecnia
Universidade Nove de Julho, São Paulo, Brasil
Rua Guaranésia, 425 - Vila Maria, São Paulo - SP, 02112-000
E-mail: maeli_tavares@hotmail.com

Ana Mariana Aparecida do Nascimento

Engenheira Civil
Universidade Nove de Julho, São Paulo, Brasil
Rua Guaranésia, 425 - Vila Maria, São Paulo - SP, 02112-000
E-mail: anamarianaaparecida@gmail.com

Bruno Carlos Ferraudo

Engenheiro Civil
Universidade Nove de Julho, São Paulo, Brasil
Rua Guaranésia, 425 - Vila Maria, São Paulo - SP, 02112-000
E-mail: bferraudo@yahoo.com.br

Ricardo Luis Rodrigues

Pós Graduando em Geotecnia
Universidade Nove de Julho, São Paulo, Brasil
Rua Guaranésia, 425 - Vila Maria, São Paulo - SP, 02112-000
E-mail: ricardo@una.com.br

RESUMO

O crescimento da população tem como consequência direta a expansão das obras de infraestrutura em solos com presença de grandes espessuras de solos instáveis e compressíveis, os quais demandam o uso de técnicas para melhorar a capacidade de carga e acelerar recalques prevenindo problemas futuros de estabilidade. Uma das técnicas que se destaca pela sua praticidade e rapidez de execução para tratamento de solos moles é o uso de colunas de injeção de argamassas associadas a geodrenos verticais. A formação de bulbos de argamassa contribui para o aumento das poropressões que aceleram a saída de água através dos geodrenos verticais, contida entre os poros das partículas sólidas das argilas moles e pouco permeáveis, aumentando sua resistência ao cisalhamento, através da redução dos seus vazios.

O presente artigo tem por objetivo verificar o desempenho da injeção de argamassa associada a geodrenos verticais em uma obra de infraestrutura através de uma espessa camada de solo mole avaliando suas mudanças físicas e mecânicas. Comprovando o melhoramento dos parâmetros geotécnicos em duas fases, antes e após o tratamento, através de investigações geotécnicas por meio de sondagens do tipo SPT, ensaio de resistência ao cisalhamento não drenada e caracterização dos solos através dos índices físicos, indicando o grau de melhoramento do maciço tratado.

Palavras-chave: Injeção de argamassa, Geodreno vertical, Tratamento de solos moles.

ABSTRACT

The population growth has as a direct consequence the expansion of infrastructure works in soils with the presence of large thicknesses of unstable and compressible soils, which demand the use of techniques to improve the load capacity and accelerate settlements preventing future stability problems. One of the techniques that stands out for its practicality and speed of execution for the treatment of soft soils is the use of grouting injection columns associated with prefabricated vertical drains. The formation of grouting bulbs contributes to the increase of poropressures that accelerate the outflow of water through the vertical drains, contained between the pores of the solid particles of the soft and poorly permeable clays, increasing their resistance to shear, through the reduction of their voids. This paper aims to verify the performance of the grouting injection associated with prefabricated vertical drains in an infrastructure work through a thick layer of soft soil, evaluating its physical and mechanical changes. Proving the improvement of the geotechnical parameters in two phases, before and after the treatment, through geotechnical investigations through SPT type surveys, undrained shear strength test and soil characterization through the physical indexes, indicating the degree of improvement of the massif treated.

Keywords: Grouting injection, Prefabricated vertical drains, Improvement soft soil.

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios na realização das obras de infraestrutura rodoviária está relacionado ao encontro de maciços de depósitos quaternários marinhos e aluvionares caracterizados por propriedades geotécnicas de baixa resistência e alta deformabilidade, exigindo da engenharia geotécnica a aplicação de técnicas de melhoramento do terreno que minimizem os problemas de recalques e de estabilidade que são típicos deste tipo de solo. Os depósitos aluvionares segundo Massad (2003), Bello (2011) e Diniz e Duarte (2012) são solos moles de baixa resistência e elevada umidade, que podem apresentar recalques consideráveis, caracterizados por argilas moles, depositados em água doce, salgada ou salobra e ocorrendo em áreas de várzea ou planícies de inundação e praia. Estudos realizados por Massad (2004) relata que oscilações do nível do mar durante o período quaternário deram dois tipos de sedimentos argilosos, os Holocênicos constituídos de argilas entremeados por camadas contínuas de areia com espessura constante até uma profundidade de 18 m, e Pleistocênicos ocorrem abaixo do holocênos e são constituídos de camadas de areia com 6 e 7 m de espessuras e de camadas de argilas média a rija situadas geralmente a uma profundidade de 20 a 25 m. Várias técnicas de melhoramento do solo têm sido empregadas a fim de melhorar artificialmente os parâmetros

mecânicos e físicos de solos moles, como *jet grouting* (Shen et al.; 2013), colunas de brita por vibrosubstituição (Debats et al. 2003), colunas de areia revestida com geotêxtil (Hosseinpour et al.; 2016); geodrenos verticais (Abuell-Naga et al.; 2006), colunas de argamassa (El-Kelesh et al.; 2012), *deep soil mixing* (Madhyannapu et al.; 2014). A eficiência do tratamento de solos moles pode ser realizada através da combinação de técnicas, sendo a utilização de colunas de argamassa associada a geodrenos verticais uma das alternativas para realizar a aceleração de recalques a partir do aumento máximo das poropressões provocada pelos bulbos de argamassa, iniciando a dissipação das pressões intersticiais na forma de perda d' água através dos geodrenos. O resultado da combinação destas duas técnicas é o aumento da resistência ao cisalhamento da camada de solo mole, diminuindo a possibilidade de recalques diferenciais. O conhecimento do tratamento de solo convencional é bastante difundido, porém a base de dados na literatura geotécnica sobre a utilização de colunas de argamassa associadas a geodrenos é restrita, devido à restrição a um pequeno número de especialistas. O presente artigo tem por objetivo apresentar dados da evolução do sistema, assim como a experiência adquirida através da realização de obras em tratamento de solos moles, através da injeção de argamassa associada a geodrenos verticais em uma obra de infraestrutura através de uma espessa camada de solo mole avaliando suas mudanças físicas e mecânicas. Comprovando o melhoramento dos parâmetros geotécnicos em duas fases, antes e após o tratamento, através de investigações geotécnicas por meio de sondagens tipo SPT, ensaio de resistência ao cisalhamento não drenada e caracterização dos solos através dos índices físicos, indicando o grau de melhoramento do maciço tratado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 GEODRENOS VERTICAIS

Estudos realizados por Chu et al., (2006), Saowapakpiboon et al. (2010) e Bo et al., (2016) analisaram que a eficiência de geodrenos verticais para aceleração de recalque e encurtando o tempo de consolidação do maciço de solo, está relacionado a profundidades em cerca de 40 m, ficando comprovado pelos pesquisadores que a utilização de geodrenos verticais, além de acelerar o recalque, aumentam a resistência ao cisalhamento e reduzem o teor de umidade das argila moles. Porém alguns cuidados são necessários na instalação dos geodrenos, pesquisadores como Casagrande e Poulos (1969), Saye (2001) e Araújo (2009) afirmam que em alguns casos durante a instalação dos geodrenos pode ser observado o efeito *smear*, ou amolgamento da argila, que consiste no efeito de adensamento no solo envolvente do dreno, provocado pela sua cravação, provocando perturbações similares ou maiores do que os drenos de areia, perdendo a eficiência de drenagem. De acordo com os pesquisadores este efeito é intensificado quando o espaçamento é menor que dois metros e que durante a cravação de drenos pré-fabricados acaba causando, de forma progressiva, ainda mais perturbações no local, de

forma a reduzir substancialmente o respectivo grau de adensamento.

A eficiência do tratamento de solos moles esta relacionada a disposição dos geodrenos verticais, Bergado et al. (1994), (Saye, 2001) e Maccarini (2010) relatam que a malha triangular garante uma abrangência maior na área tratada onde os geodrenos forem cravados, garantindo um adensamento mais uniforme com maior dissipação do excesso de pressão neutra, sendo que drenos com espaçamentos menores que 1,5 m não resultam em benefícios relativos a velocidade de adensamento. Os geodrenos são formados por um núcleo de plástico com ranhuras em forma de canaleta envolto por um filtro geossintético não tecido de baixa gramatura (Figura 1a), sendo que o dimensionamento da malha triangular de geodrenos verticais (figura 1b), é baseado na teoria de adensamento radial, sua forma retangular (a,b) de acordo com Rixner et al. (1986) e corrigida de acordo com o diâmetro equivalente (dw), conforme equação (1).

Figura 1. (a) detalhe Geodreno dimensões 5 x 100 mm, (b) detalhe da malha trinagular de cravação do geodreno.



(a)

(b)

Fonte: autores (2020).

$$dw = 2 \frac{(a+b)}{1} \tag{1}$$

O espaçamento entre os drenos pode ser relacionado com o diâmetro de influência do dren (de), sendo que para malha triangular adota-se a equação (2).

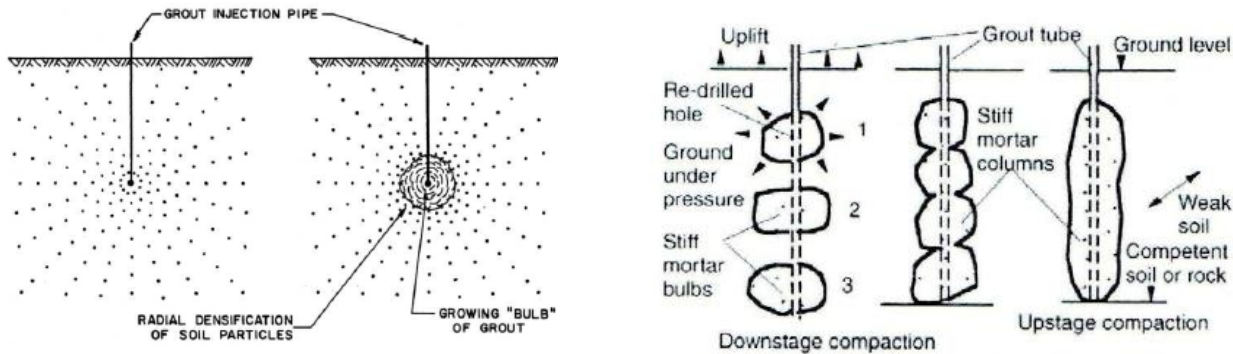
$$de = 1,5 \cdot s \tag{2}$$

2.2 INJEÇÃO DE COLUNAS DE ARGAMASSA

Pesquisas realizadas por Moseley e Kirsch (2004) e Tuncdemir (2007) relatam que a técnica do grauteamento auxilia significativamente na mitigação da liquefação do solo, e além de preencher os

vazios no solo, o grauteamento contribui com o aumento da resistência à deformação, resistência ao cisalhamento, compressão uniaxial, coesão e redução da condutividade. O sistema de injeção formando colunas de argamassa resulta na compactação da argamassa em aberturas e espaços vazios do solo, este método é constituído por injetar uma massa de consistência plástica no solo com *slump flow* de 500 mm, gerando ambos deslocando e compactação, sendo seu uso é limitado para solos compressíveis ou de baixa compactação. Os primeiros estudos realizados por Graf (1969) e Brown e Warner (1973) demonstra o conceito básico de *Compaction Grouting* sendo uma injeção de um crescente "bulbo" de argamassa que age deslocando as partículas do solo circundante e radialmente, gerando a compactação do solo a partir do ponto de injeção, conforme demonstra a figura 2 (a). Conforme Chu et al. (2009) a evolução do sistema, pode ser verificada através de figura 2 (b), onde diferencia a sequencia executiva do sistema de bulbos em relação a formação de colunas rígida de argamassa.

Figura 2. (a) Sistema de consolidação radial (GRAF, 1969), (b) Comparação entre sistema, através da formação de bulbos e colunas de argamassa.



Fonte: Chu et al. (2009).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS E ENSAIOS LABORATORIAIS

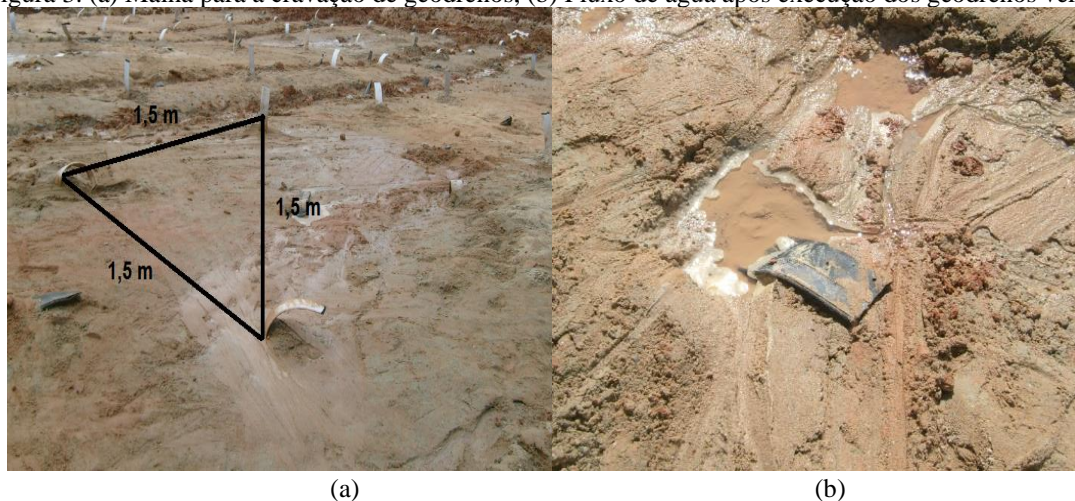
Todos os ensaios descritos a seguir foram realizados em duas campanhas de ensaios geotécnicos, antes e após o tratamento de solo indicando o grau de melhoramento dos parâmetros mecânicos e físicos do maciço de solo mole. Foram realizadas investigações geotécnicas por meio de sondagens do tipo SPT (ABNT-NBR 6484, 2001). As amostras coletadas durante a realização de sondagem SPT, foram armazenadas conforme as recomendações (ABNT-NBR 9604, 2016) para a realização de ensaios laboratoriais e caracterização dos índices físicos do solo local. Para a obtenção dos parâmetros físicos dos solos, foram conduzidos os seguintes ensaios laboratoriais, como limite de liquidez (ABNT-NBR 6459, 1984), limite de plasticidade (ABNT-NBR 7180, 1984), teor de umidade natural (ABNT-NBR 6457, 1984), índice de vazios e determinação da massa específica (ABNT-NBR 6508, 1984), para verificação da diminuição de água nos poros das argilas. A partir das amostras

coletadas preparou-se corpos de prova com dimensões (50 x 100 mm), ao qual forma submetidas a determinação da resistência ao cisalhamento triaxial não adensado e não drenado (UU), com tensões confinantes de 50, 100, 150 e 200 kPa, conforme especificações da ASTM-D2850 (2003).

3.2 EXECUÇÃO DE COLUNAS DE ARGAMASSA ASSOCIADAS A GEODRENOS VERTICAIS

A solução proposta para a melhoria do solo mole e aceleração do processo de consolidação dos materiais aluvionares é através da injeção de colunas de argamassa associadas a instalação de geodrenos verticais, atravessando essa camada de solo mole. A avaliação do programa experimental ocorreu após a execução de aterro com areia com espessura da ordem de 1 metro, os geodrenos verticais foram instalados de forma a atravessar integralmente a formação aluvionar com profundidade de 12 m. A malha dos geodrenos executadas possui uma distribuição do tipo triangular, com afastamentos de 1,5 m (Figura 3a), após a cravação dos geodrenos na camada aluvionar em estudo o fluxo de água foi contínuo nas primeiras horas (Figura 3b), com diminuição após 72 horas.

Figura 3. (a) Malha para a cravação de geodrenos, (b) Fluxo de água após execução dos geodrenos verticais.

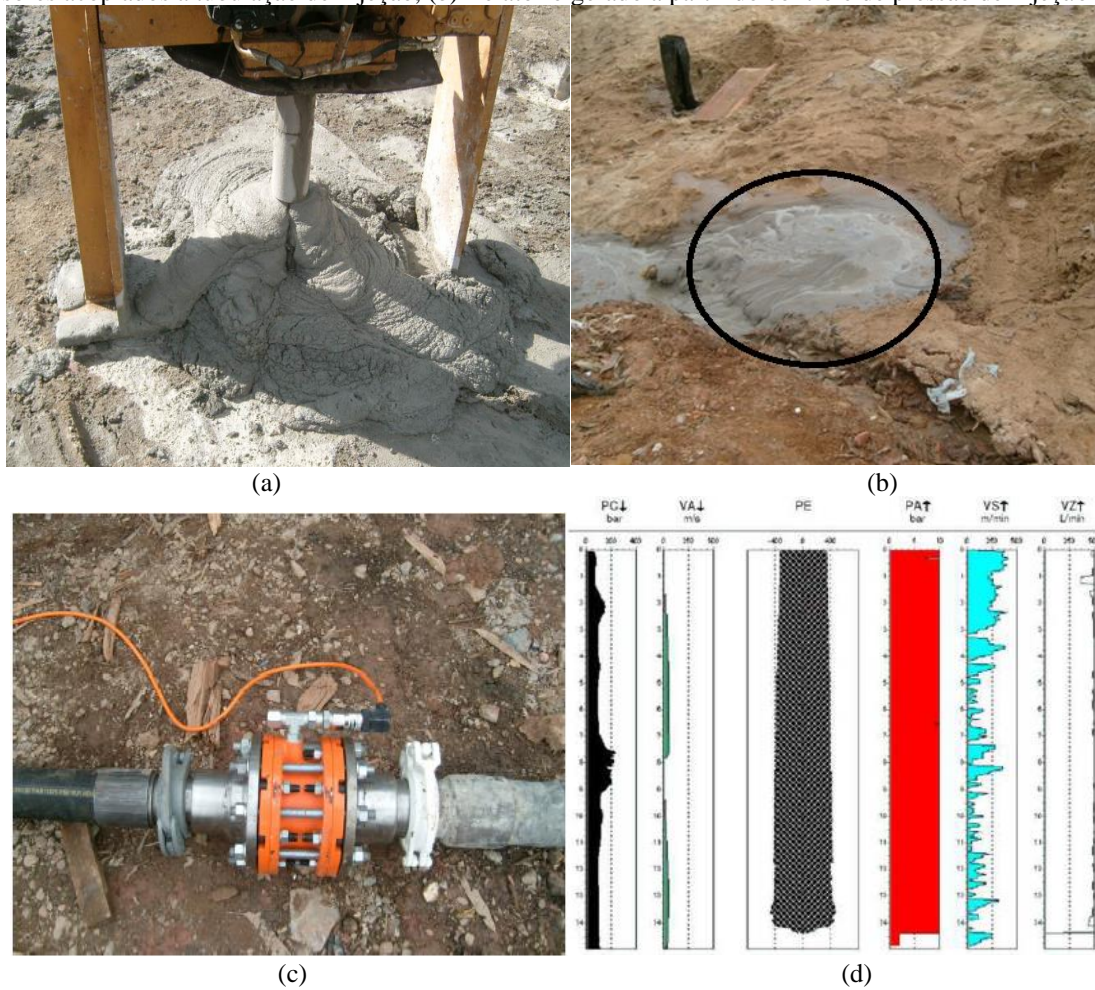


Fonte: autores (2020).

O tratamento com colunas de argamassa foi realizado dentro da malha triangular dos geodrenos através da cravação de um tubo contínuo (Figura 4a), pelo qual durante a retirada é realizada a injeção simultânea (contínua ou com paradas) de argamassa em intervalos a depender do tipo de solo, formando vários bulbos de injeção (Figura 4b). Durante a execução do tratamento de solo, foi realizado o monitoramento da injeção com argamassa, através de sensor acoplado a tubulação de injeção (Figura 4c), possibilitando executar leituras e medições de registros em tempo real das condições de execução realizadas durante a cravação do tubo e injeção de argamassa. Estes sensores permitem determinar a pressão e o volume injetado através dos parâmetros envolvidos nesta operação, apresentando junto aos relatórios (Figura 4d) dados da pressão de cravação (PC), velocidade de avanço (VA), perfil da coluna

(PC), pressão da argamassa (PA), velocidade de subida da haste (VS), além da vazão baseado no volume injetado (VZ). Estudos realizados por Riccio et al. (2013) demonstram que o controle de injeção é efetuado com base no volume injetado e na pressão de injeção, sendo usual para o tratamento o volume mínimo de 1000 litros de argamassa e pressão de injeção da ordem de 100 kPa a 1000 kPa, tomando como critério de parada quando se atinge um dos critérios de paralisação, volume ou pressão.

Figura 4. (a) Tubo contínuo para injeção de argamassa, (b) Coluna de argamassa após injeção, (c) Monitoramento através de sensores acoplados a tubulação de injeção, (d) Relatório gerado a partir do controle de pressão de injeção e vazão.



Fonte: autores (2020).

Durante a preparação das argamassas junto aos misturadores foram retiradas 10 amostras com dimensões de 50x100 mm, com resistência à compressão simples (f_c) média de 26 MPa, ensaiados conforme ABNT-NBR 5739 (2007) e módulo de deformação inicial (E_{ci}) médio de 29 GPa, calculado de acordo com ABNT- NBR 8522 (2008), ensaiados aos 28 dias. Para injeção de argamassa foram considerados um traço o equivalente á (1 saco de cimento CII-E-32, 65 litros de areia média grossa e 35 litros de água), com *slump test* de 25 ± 2 conforme ABNT-NBR NM 67 (1998) e *slump flow* de 500 mm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

A tabela 1 demonstra as características geotécnicas e os índices físicos das amostras antes do tratamento de solo.

Tabela 1. Caracterização geotécnicia antes do tratamento de solo.

Prof. (m)	LL (%)	LP (%)	IP	IC	W (%)	e ₀	γ _{nat} (KN/m ³)
2	45	15	30	0,4	32	2,28	16,9
4	51	19	32	0,5	35	2,22	16,3
6	53	20	33	0,7	29	2,07	16,5
8	56	17	39	0,6	32	2,02	16,0
10	55	21	34	0,7	30	2,03	16,4
12	57	22	35	0,6	37	2,15	17,1

Onde: LL (limite de liquidez), LP (limite de plasticidade), IP (índice de plasticidade), IC (índice de consistência) W (teor de umidade), e₀ (índice de vazios), γ_{nat} (peso específico natural). Fonte: autores (2020).

Evidentemente, as características do solo são distintas de acordo com a profundidade, com maior concentração de água a partir da cota -2m, aonde encontra-se o nível de lençol freático, preenchendo os vazios do solo, reduzindo o peso específico, aumentando o índice de plasticidade, limite de liquidez e diminuindo a plasticidade, tornando esta camada mais crítica para a estabilidade do solo. A eficiência do tratamento de solos moles associando duas técnicas pode ser verificada através do processo que visa melhorar as propriedades físicas do solo através da redução dos vazios tornando o maciço mais homogêneo, conforme indicado na Tabela 2. Com a diminuição do índice de vazios do solo, nota-se uma redução da variação dos teores de umidade, conseqüentemente dos limites de liquidez, contribuindo com o aumento plasticidade do solo e peso específico natural do solo.

Tabela 2. Caracterização geotécnicia após o tratameto de solo.

Prof. (m)	LL (%)	LP (%)	IP	IC	W (%)	e ₀	γ _{nat} (KN/m ³)
2	35	24	11	1,8	15,4	0,66	19,1
4	34	22	12	1,6	14,7	0,60	19,3
6	36	24	12	1,7	15,8	0,58	19,7
8	33	20	13	1,7	11,2	0,55	19,8
10	37	23	14	1,8	12,3	0,62	19,5
12	35	25	10	2,3	11,7	0,59	19,6

Onde: LL (limite de liquidez), LP (limite de plasticidade), IP (índice de plasticidade), IC (índice de consistência), W (teor de umidade), e₀ (índice de vazios), γ_{nat} (peso específico natural). Fonte: autores (2020).

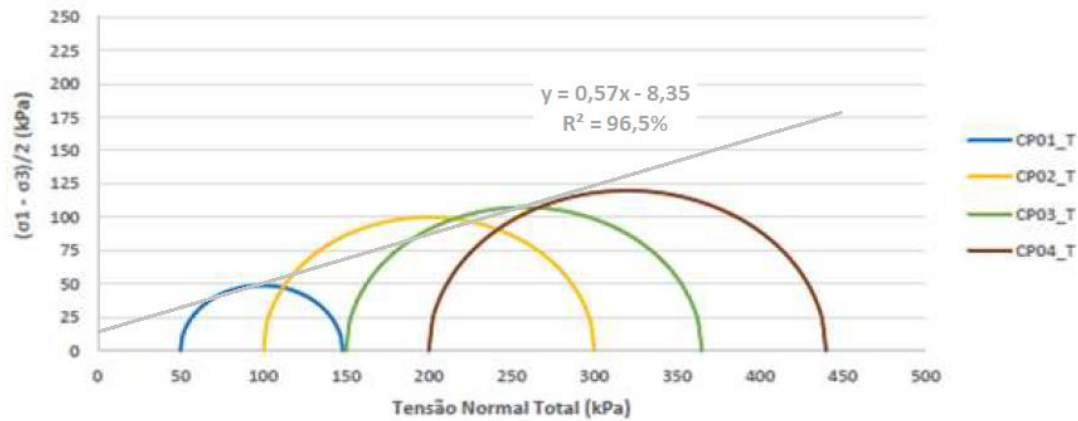
O aumento da tensão gerada pela injeção da argamassa contribui para diminuição do índice de vazios (e) aumentando o peso específico do solo, através da dissipação de água pelos geodrenos, além rebaixar o nível d' água após o tratamento de solo, a média de índice de vazios teve uma redução de 72 %. As propriedades das camadas de solo tratado foram alteradas de forma satisfatória, em suas

propriedades físicas. Uma redução média de 44% para o Limite de Liquidez e um aumento médio de 21 % para o limite de plasticidade. Os índices físicos, limite de liquidez (LL), índice de plasticidade (IP) e o índice de consistência (IC) são utilizados para avaliar a variação de volume dos solos compactados, bem como a variação do teor de umidade por contração ou por imersão em água ocasionado expansão. Pode-se observar que ocorre uma significativa redução no (IP) em torno de 35% transformando as camadas de solo em fracamente plástica para altamente plástica, melhorando a sua trabalhabilidade, e um aumento de 65% no (IC) melhorando a consistência de médio para duro, após a realização do tratamento de solos. A classificação das mudanças das características de plasticidade e consistência foi realizada conforme Pinto (2006). Estudos realizados por Pachla (2016) e Samokhvalov et al. (2016) verificaram que injeções a base de materiais cimentícios provocam alterações das características físicas devido a compactação radial do solo, aumentando o peso específico do solo em torno de 25%, e diminuindo em cerca de 38% o teor de umidade, contribuindo para aumentar a capacidade de carga dos solos. A presente pesquisa corrobora com os valores dos pesquisadores, através da constatação de um aumento médio em 20% para o peso específico natural e uma diminuição média de 52% para o teor de umidade.

4.2 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

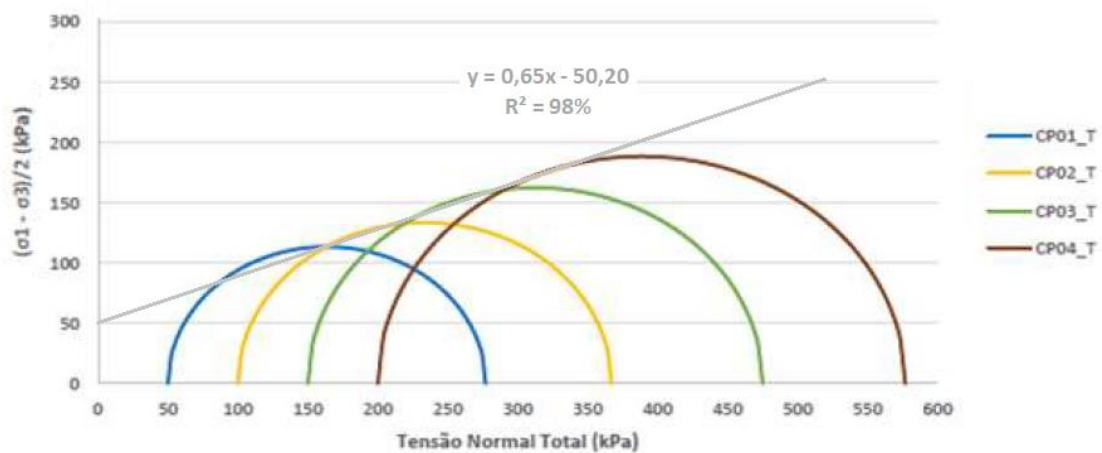
O ensaio consistiu em aplicar as tensões confinantes de 50, 100, 150 e 200 kPa, para os ensaios não drenados. Analisando os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtido para as amostras antes e após o tratamento, pode-se observar que as diferenças entre as amostras são significativas a ponto de considerar a eficiência do tratamento. Do encontro dessas duas retas obteve-se a deformação axial e a tensão cisalhante de ruptura a fim de traçar a reta Mohr-Coulomb e determinar os valores de c (intercepto coesivo) e ϕ (ângulo de atrito). A figura (5) e (6) mostra os círculos de Mohr traçados para cada tensão confinante aplicada, a partir da tensão principal maior e tensão confinante, para as amostras obtidas antes e após o tratamento do solo.

Figura 5. Envoltórias de resistência ao cisalhamento, das amostras ensaiadas antes do tratamento de solo.



Fonte: autores (2020).

Figura 6. Envoltórias de resistência ao cisalhamento, das amostras ensaiadas após o tratamento de solo.



Fonte: autores (2020).

Os valores de c e ϕ obtidos para as amostras antes tratamento foram de 8,35 kPa e 32,62°, respectivamente. Autores como Massad (1994) e Mello (2019) analisaram amostras de depósitos aluvionares através de ensaios triaxial, com valores de índice de resistência a penetração (N_{SPT}) variando entre 0 a 8 golpes, pode-se dizer que os resultados obtidos foram próximos entre si, com coesão (C) e ângulo de atrito (ϕ) característico de solos moles. Segundo Baumgartl e Horn (1991) quando se utilizam cargas normais menores que esse valor, os agregados permanecem intactos e a envoltória é definida pela coesão e pelo atrito entre estes, resultando em um ângulo de atrito maior, em razão da rugosidade superficial e do tamanho dos agregados, e em um intercepto de coesão menor. Dessa forma a equação (3), representa a envoltória Mohr-Coulomb, em termos de tensões totais para o solo no estado indeformado.

$$S = 8,35 + \sigma \cdot \text{tg } 32,62^\circ \text{ (kPa)} \tag{3}$$

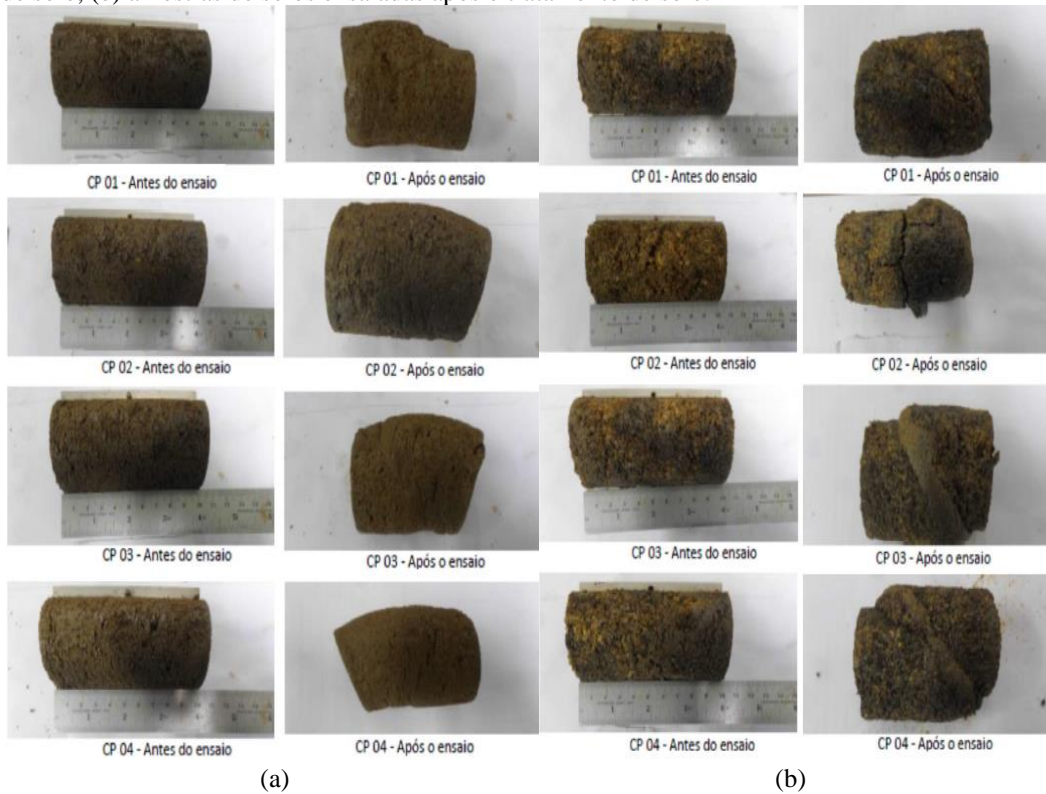
Após o tratamento de solo os valores de c e ϕ foram de 50,20 kPa e 33,82°, considerando um aumento de 84% para coesão e 4% para o ângulo de atrito, em relação aos parâmetros antes do tratamento. A variação de mudança da coesão foram encontradas por Zhang et al. (2020), avaliando a injeção de argamassas e solos arenosos com 10% de teor de argila, verificando que a coesão em solos arenosos aumenta de 9,4 kPa para 40 kPa, e solos com um teor de argila de 100%, a coesão aumenta de 40 kPa para 150 KPa, demonstrando que a resistência ao cisalhamento de solos moles com presença de areia e argila pode ser melhorada efetivamente pela compactação ocasionada pelas colunas de argamassa. De acordo com Zhang (2020), o aumento da coesão é proporcional ao volume de argamassa injetada. As características de mudança destes parâmetros, enquadra-se dentro dos valores encontrados por pesquisadores como Braida et al. (2007) e Porto et al. (2019), ao qual analisaram amostras de solos residuais, demonstrando a eficiência do tratamento de solos após o tratamento de colunas de argamassa associada a geodrenos, deixando as característica de solos aluvionares como de solos residuais. De acordo com Braida et al. (2007) quando se aplicam pressões normais maiores que a resistência dos agregados, estes se rompem e a envoltória de cisalhamento passa a ser definida por coesão e atrito entre as partículas primárias do solo. Lebert e Horn (1991) verificaram que nesse caso, o intercepto de coesão é maior, em razão da maior interação entre as partículas primárias, e o ângulo de atrito interno é menor, devido à reduzida rugosidade e ao menor tamanho das partículas. A equação (4) representa a envoltória Mohr-Coulomb, em termos de tensões totais para o solo no estado deformado após o tratamento de solo, verificando maiores valores de coesão conforme verificado por Lebert e Horn (1991).

$$S = 50,20 + \sigma \cdot \text{tg } 33,82^\circ \text{ (kPa)} \quad (4)$$

A figura (7) mostra as amostras antes do ensaio e a superfície de ruptura após o ensaio de compressão triaxial, para as amostras avaliadas antes e após o tratamento de solo. As amostras de solo antes do tratamento apresentaram um plano de ruptura ao cisalhamento não bem definido com característica de abaulada, ao contrario das amostras após o tratamento com plano de ruptura ao cisalhamento bem definido. De acordo com Rigo (2005) para menores níveis de tensão normal, as partículas do solo são capazes de resistir aos esforços cisalhantes e fazem com que a resistência ao cisalhamento pós-ruptura se dê majoritariamente pela simples fricção entre as partículas e agregados do solo, a evidência deste comportamento é verificada através das amostras ensaiadas antes do tratamento (figura 7a), demonstrando as amostras praticamente intactas. Segundo Porto et al. (2019) em ensaios com maiores níveis de tensão normal, a estrutura do solo, quando submetida a elevados esforços de cisalhamento, sofre efeitos de plastificação, formando uma superfície de ruptura a partir da reorientação de partículas e induzindo solicitações de cisalhamento sobre a microestrutura do solo. A

presente pesquisa corrobora com esta constatação, demonstrando que após o tratamento de solo as amostras são submetidas a maiores esforços de cisalhamento formando uma superfície de ruptura mais definida (figura 7b).

Figura 7. Amostras de solos antes e após ensaios de cisalhamento triaxial, (a) amostras de solos ensaiadas antes do tratamento de solo, (b) amostras de solos ensaiadas após o tratamento de solo.



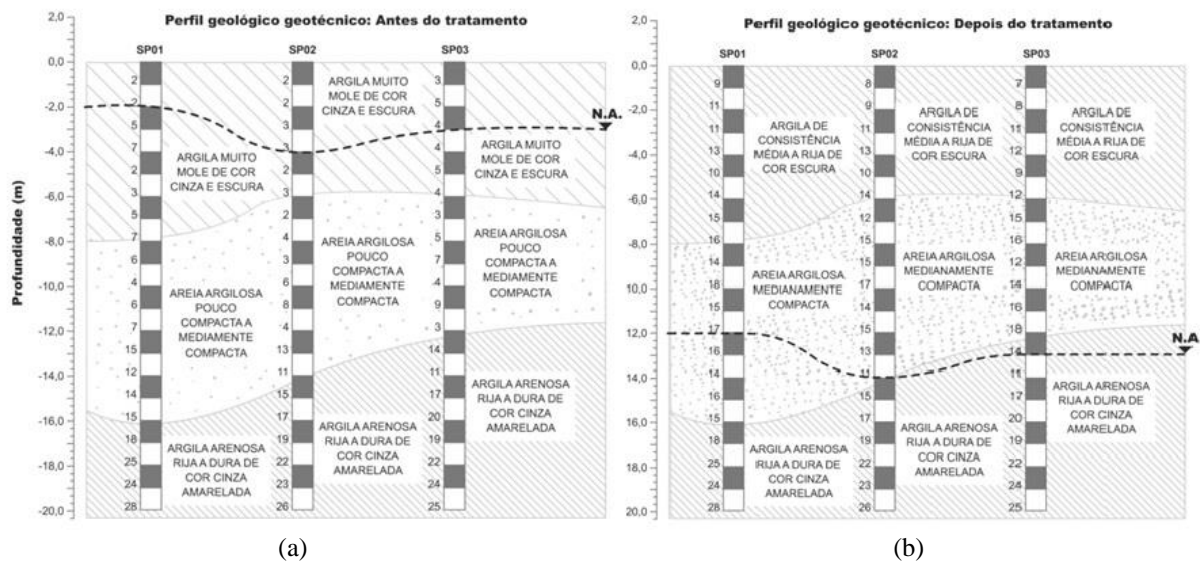
Fonte: autores (2020).

4.3 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS ENSAIOS DE SONDAGEM SPT

De acordo com Pizzato e Santos (2018) o município de Guarulhos, é composto, por dois tipos de rochas, as sedimentares e as cristalinas, resultantes dos processos vulcânicos. As estruturas geológicas têm como o processo de evolução urbana verificar ao longo da ocupação territorial do município. Nas áreas sedimentares do município encontra-se em grandes profundidades presença de embasamento cristalino, e subjacentes as rochas, presença de água subterrâneas. Segundo Graça et al. (2007) na região de Guarulhos, observa-se relevos convexos e suavizados, em rochas sedimentares terciária, além de planícies fluviais compostas por sedimentos do quaternário. A figura (8a) demonstra o perfil geológico representado pela sondagem SPT em um dos pontos mais crítico no início da obra. A ocorrência de um perfil com um horizonte superficial de material argiloso de cor escura com espessura de 6 m de característica mole, seguida de uma camada espessa variando entre 6 a 8 m de areia argilosa compacta, sobreposta por uma camada de 4 a 8 m de argila arenosa rija a dura, com presença de nível de água a -2 m da superfície.

O perfil geológico representada pela figura (8b), demonstra os parâmetros de resistência N_{SPT} , 10 meses após o tratamento com injeção de colunas de argamassa associada a geodrenos verticais.

Figura 8. Perfil geológico sondagem SPT: (a) antes do tratamento de solos moles, (b) após do tratamento de solos moles.



Fonte: autores (2020).

Nota-se que houve uma variação da primeira e segunda camada de solo, em relação a variação do número de golpes, bem como a consistência comparando os perfis geológicos acima. A primeira camada de característica argilosa de consistência mole passou de valores médios de N_{SPT} entre 2 a 3 antes do tratamento, para consistência média a rija com valores N_{SPT} médio entre 10 a 12. A segunda camada de característica arenosa passou de valores médios de N_{SPT} entre 4 a 6 de compactidade de pouca compacta para muito compacta, antes do tratamento, para uma camada de compactidade medianamente compacta a compacta com valores médios de N_{SPT} entre 13 a 15 golpes. O tratamento do solo melhorou significativamente o maciço aluvionar com um percentual de 75% para camadas argilosas e de 40% para o perfil de solos arenosos. Este aumento de capacidade de carga dos solos foi constatado por Silva (2015), verificando que injeções de fluidos cimentícios realizam uma compactação no maciço gerando um aumento estimando experimentalmente em um aumento de 30% para valor de N_{SPT} em solos de formações aluvionares e sedimentares. Segundo Vesic (1972), Manfred (1990) e Ciria (2000) a injeção radial por argamassa envolve as fraturas, substituindo a água presente nos vazios no solo, através de uma argamassa fluida, reduzindo a permeabilidade além de reforçar o maciço de solo. A presente pesquisa corrobora com estudos realizados pelos pesquisadores, verificando que a compactação radial formado pelas colunas de argamassa além de melhorar os parâmetros mecânicos, conforme verificado pelo aumento dos valores de N_{SPT} , contribui para diminuir a

condutividade hidráulica do maciço através de variação do nível de lençol freático, passando da cota média entre -2 e 4 m, antes do tratamento, para a cota média entre -12 A -14 m.

5 CONCLUSÕES

- O processo de enrijecimento de solos moles através da execução de geodrenos associado a injeção de colunas de argamassa, modifica as características mecânicas e físicas de solos moles.

- A variação volumétrica, provocada pelo aumento máximo das poropressões provocada pelo processo de perda d'água pelos geodrenos verticais, durante o confinamento do solo ocasionado pela injeção de argamassa, promove o aumento substancial da resistência da argila ao longo de toda a profundidade do solo mole.

- Os ensaios de campo e laboratório realizados na presente pesquisa, enquadra-se nas faixas de valores obtidos pela experiência brasileira.

- Para melhor contribuição da eficiência do melhoramento de solos moles, deve-se considerar os parâmetros técnicos antes e depois do tratamento como sondagens, índices físicos dos solos, resistência ao cisalhamento e espessura da camada de solo a ser tratada.

- Diante disso analisam-se as variáveis necessárias como profundidade e distância entre colunas de argamassa e os geodrenos, além da espessura do colchão drenante.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, G. L. Estudo em Laboratório e em Campo de Colunas Granulares Encamisadas com Geossintético. Tese de Doutorado. UNB – Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia. Brasília. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 6459: Solo-Determinação do Limite de Liquidez. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro, p. 6. 1984.

ABNT. NBR 7180. NBR NM 67. Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. 1998.

ABNT. NBR 7180: Solo- Determinação do Limite de Plasticidade. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro, p. 3. 1984.

ABNT. NBR 6484: Solo- Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT-Método de Ensaio. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro, p. 17. 2001.

ABNT. NBR 9604. Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro. 2016.

ABNT. NBR 5739. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT. NBR 8522. Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 16p. 2008.

ASTM. Standard Test Method for Unconsolidated Undrained Triaxial compression Test on Cohesive Soils. D2850-03a. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 6 p. 2003. 2003.

ABUEL-NAGA, H. M.; BERGADO, D. T.; CHAI PRAKAIKEOW, S. Innovative thermal technique for enhancing the performance of prefabricated vertical drain during the preloading process. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 24, n. 6, p. 359-370, 2006.

BAUMGARTL, Th; HORN, R. Effect of aggregate stability on soil compaction. *Soil and Tillage Research*, v. 19, n. 2-3, p. 203-213, 1991.

BELLO, M. I. M. C. V. Parâmetros geotécnicos e banco de dados de argilas moles: o caso de Suape. Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco. UFPE. Recife, 2011.

BERGADO, D. T.; ANDERSON, L. R. E.; BALASUBRAMANIAM, A. S. *Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments*. Rotterdam : American Society of Civil Engineers, New York, NY, p. 232. 1994.

BO, M. W.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S.; CHINKULKIJNIWAT, A.; LEONG, M. Laboratory measurements of factors affecting discharge capacity of prefabricated vertical drain materials. *Soils and Foundations*, v. 56, n. 1, p. 129-137, 2016.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; SOARES, J. M. D.; REINERT, D. J. Resistência inter e intra-agregados em ensaios de cisalhamento direto de um Nitossolo Vermelho distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 2, p. 379-386, 2007.

BROWN, D. R., WARNER, J. Compaction Grouting, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 99, No. SM, Proc. Paper 9908, Aug., pp. 589-601. 1973.

CASAGRANDE, L.; POULOS, S. "On the Effectiveness of Sand Drains". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 6, n° 3, p. 286-326. 1969.

CIRIA. "Betume para engenharia de injeção". CRIRIA press, Londres, Reino Unido, ISBN 086017 514 6. pp: 17-22, 2000.

CHU, J.; BO, M. W.; CHOA, V. Improvement of ultra-soft soil using prefabricated vertical drains. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 24, n. 6, p. 339-348, 2006.

CHU, J., VARAKSIN, S., MENGÉ, P. State of the art report, Construction processes procédés de construction. In. 17TH International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, ISSMGE, October., pp. 1-130. 2009.

DEBATS, J. M.; GUETIF, Z.; BOUASSIDA, M. Soft soil improvement due to vibro-compacted columns installation. In: Proc. International Workshop on Geotechnics of soft soils-Theory and practice. Noordwijkerhout-Netherlands. p. 551-556. 2003.

DINIZ, H. N.; DUARTE, U. Caracterização geológica e Hidrogeológica da bacia hidrográfica do rio Baquirivu-Guaçu na região de Guarulhos, SP. *Revista Geociência-UNG-Ser*, v. 1, n. 3, p. 51-61. 2012.

EL-KELESH, A. M.; MATSUI, T.; TOKIDA, K. F. investigation into effectiveness of compaction grouting. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, v. 138, n. 4, p. 451-460, 2012.

GRAÇA, B. A.; SAAD, A. R.; ANDRADE, M. R. M., OLIVEIRA, A. M.; ETCHEBEHERE, M. L.; QUEIROZ, W. Condicionantes Geoambientais no Processo Histórico da Ocupação Territorial do Município de Guarulhos, estado de São Paulo, Brasil. *Revista Geociências-UNG-Ser*, v. 6, n. 1, p. 163-190, 2007.

GRAF, E.D. Compaction Grouting Technique, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divison, ASCE*, Vol. 95, No. SM5. Proc. Paper 6766, Sept., pp. 1151-1158. 1969.

HOSSEINPOUR, I.; ALMEIDA, M. S.S.; RICCIO, M. Melhoria do solo mole por colunas revestidas com geotêxtil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, v. 169, n. 4, pág. 297-305, 2016.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil and Tillage Research*, v. 19, n. 2-3, p. 275-286, 1991.

MACCARINI, M. Projeto Geotécnico de um aterro industrial sobre solos moles para implantação de um estaleiro para a empresa Azimut do Brasil em Itajaí-SC. Florianópolis . Relatório Técnico. p. 24. 2010.

MANFRED R. HAUSMANN. "Engineering Principles of Ground Modification". McGraw-Hill, Inc., EUA, ISBN 0 07 027279 4. P. 346-402. 1990.

MASSAD, F. *Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia*. Oficina de Texto, São Paulo, 2003.

MASSAD, F. A ação de dunas nas argilas marinhas e os edifícios inclinados de Santos. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS – SEFE, 5, São Paulo. Anais... São Paulo: ABMS, 2004. v.2, p.168-180. 2004.

MASSAD, F. Sea Level Movements and Preconsolidation of Some Quaternary Marine Clays. *Revista Solos e Rochas, Revista Latino-Americana de Geotecnia, ABMS*, 1994, v.17, no.3, p.205-215.

MADHYANNAPU, R. S.; PUPPALA, A. J. Design and construction guidelines for deep soil mixing to stabilize expansive soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 140, n. 9, p. 04014051, 2014.

MELLO, T. C. R. Estudo do comportamento de aterros sobre solos moles reforçados com colunas de brita, estudo de caso: BR-135/MA. Dissertação de Mestrado, UNB- Universidade de Brasília, p. 170. 2019.

MOSELEY, M. P.; KIRSCH, K. *Ground improvement*, 2nd Ed., E & FN Spon, London. ISBN 0 415 27455 9. p: 119-160. 2004.

PACHLA, H. Conditions of proper interaction of low-pressure injection piles (LIP) with structure and soil, carrying capacity of pile anchorage in foundation. *Studia Geotechnica et Mechanica*, v. 38, n. 4, p. 33-49, 2016.

PINTO, C.S. *Curso básico de mecânica dos solos*. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PIZZATO, E. SANTOS, D. N. *Aspectos Geológicos e Emergências Químicas em Grandes Rodovias*:

O Caso da BR-116, Trecho da Cidade de Guarulhos (SP) Brazil. Vol. 39 N.51. 2018.

PORTO, M. S.; BRESSANI, L. A.; SILVEIRA, F. G. Resistência ao Cisalhamento de Solos Residuais em Encostas da Formação Serra Geral no RS. In: XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul. 2019.

RIGO, M. L. Mineralogia, intemperismo e comportamento geotécnico de solos saprolíticos de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Porto Alegre. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2005.

RICCIO, M.V.F., BARONI, M. e ALMEIDA, M.S.S. Ground Improvement in Soft Soils in Rio de Janeiro: the case of Athletics Park, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Special Issue, Vol. 166, pp. 36-43. 2013.

RIXNER, J.J.; KRAEMER, S.R.; SMITH, A.D. Prefabricated vertical drains. Engineering Guidelines, (No. FHWA/RD-86/168). Federal Highway Administration, Washington DC, vol. 1. 1986.

SAYE, S. R. Assessment of soil disturbance by the installation of displacement sand drains and prefabricated vertical drains. In: Soil Behavior and Soft Ground Construction. p. 325-362. 2001.

SAMOKHVAL, M., ZAZULYA, J., MELNIKOV, R., MIRONOV, V. Design Calculation of Drill- Injection Piles with Controlled Broadening and Silty-Clayed Soil Foundation Basic Interaction Parameters. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, p. 01009. 2016.

SAOWAPAKPIBOON, J.; BERGADO, D. T.; YOUWAI, S.; CHAI, J. C.; WANTHONG, P.; VOOTTIPRUEX, P. Measured and predicted performance of prefabricated vertical drains (PVDs) with and without vacuum preloading. Geotextiles and Geomembranes, v. 28, n. 1, p. 1-11, 2010.

SILVA, R. R. Contribuição para escavação em solo aluvionar através da técnica de injeção de consolidação. In: SEFE- Seminário de Engenharia Profundas Especiais, São Paulo – SP. 2015.

SHEN, SL.; WANG, ZF.; HORPIBULSUK, S.; KIM, YH. Jet grouting with a newly developed technology: the twin-jet method. Engineering Geology, v. 152, n. 1, p. 87-95, 2013.

TUNCDEMIR, F. Theoretical and practical aspects of compaction grouting. Teknik Dergi, v. 18, n. 1, p. 4069-4080, 2007.

VESIC, A. S. Expansion of cavities in infinite soil mass, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 98, No. SM, Proc. Paper 8790, Mar., pp. 265-290. 1972.

ZHANG, L.; ZHANG, Q.; LI, Z.; WANG, H. Test on Compaction Reinforcement Effect of Sand. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2020, 2020.