

COMPACTAÇÃO DE SOLOS SOBRE TUBOS ENTERRADOS PELO MÉTODO DE HIDRO-VIBRAÇÃO

COMPACTION OF SOILS ABOVE UNDERGROUND PIPES USING HYDRO-VIBRATION METHOD

Coelho, Lucas Francisco de Carvalho; *UNIFEB- Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos, Barretos-SP, Brasil, coelho.cfl@gmail.com*

RESUMO

O processo de instalação de tubulações flexíveis enterradas, para uso em infraestrutura sanitária, necessita prever cuidados especiais com a compactação do material de aterro, ou envoltória. Propõe-se, neste trabalho, a utilização do método de compactação ora denominado por Hidro-vibração, visando a densificação do solo de recobrimento de tubulações flexíveis. A fim de justificar a metodologia apresentada, estabelece-se uma comparação teórica com o método denominado Vibro Compactação. As conclusões obtidas serão baseadas no desenvolvimento teórico e nas observações empíricas de testes executados pelo autor.

ABSTRACT

The flexible pipeline burying process, used in sanitary infrastructures, needs to provide special care related to the compacting of the landfill material, or envelopment. This work proposes the utilization of the compaction method, herein named Hydro-vibration, aimed at the densification of the soil that will cover the flexible pipes. In order to justify the proposed methodology, a theoretical comparison has been established with the method called Vibro Compaction. The reached conclusions shall be grounded on the theoretical development and empirical observations performed by the author.

1 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da infraestrutura urbana de uma determinada sociedade deve prever adequadamente instalações de sistemas sanitários de qualidade. No Brasil, os índices de qualificação do saneamento básico ainda são baixos, mais de 100 milhões de pessoas sem saneamento básico (Instituto Trata Brasil, 2016), e estão longe de se tornarem satisfatórios à população. Tais obras são dispendiosas financeiramente e exigem grandes intervenções. A aplicação de materiais e técnicas mais adequadas pode reduzir os custos de instalação de tubos para esgotamento sanitário e drenagem urbana, por exemplo. O estudo apresentado neste artigo procura demonstrar a possibilidade de aplicar um método de compactação que seja eficiente em aumentar a densidade do solo que envolve tubulações flexíveis, tornando a estrutura mecanicamente resistente. Este método, por sua vez, é semelhante ao de Vibro Compactação, já consolidado e difundido pela comunidade geotécnica. Sendo assim, uma comparação teórica entre ambos será estabelecida com o intuito de argumentar em favor da técnica proposta. Além disto, para demonstrar a aplicação do método, foram executados testes em campo, que serão aqui apresentados e discutidos.

2 - TUBOS ENTERRADOS

2.1 - Introdução

Os tubos enterrados são equipamentos básicos nos sistemas urbanos de infraestrutura sanitária. Possuem características peculiares que condicionam seu uso em relação tanto à aplicação quanto ao local de instalação. Tais tubos podem ser genericamente categorizados em rígidos e flexíveis, conforme suas características mecânicas intrínsecas.

2.2 - Tubos rígidos

Os tubos rígidos possuem tal denominação devido à sua estrutura. Possuem seção transversal relativamente espessa e material capaz de conferir tal rigidez à peça. Podem ser confeccionados em concreto armado, aço, cobre ou mesmo cerâmica. No Brasil, os tubos de concreto armado, por exemplo, possuem rigidez classificada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua NBR 8890:2008. Os tubos desta categoria não necessitam de uma condição especial do solo envolvente, pois possuem capacidade de resistir às cargas de aterro e possíveis sobrecargas oriundas da superfície, com deformações relativamente baixas. Portanto, a resistência passiva do solo lateral não é mobilizada, diminuindo a exigência quanto à compactação do solo na envoltória do tubo.

2.3 - Tubos flexíveis

Os tubos desta categoria são produzidos em material e forma que conferem flexibilidade, ou seja, são passíveis de conformação e retornam à forma original quando abandonado agente conformador. Neste trabalho estarão relacionados exclusivamente os tubos poliméricos termoplásticos. Isto porque, como uma propriedade de polímeros, a resistência e a elasticidade conferem aos tubos certa capacidade mecânica que agrega valor e benefícios em sua utilização como solução de infraestrutura sanitária. Entretanto, algumas considerações geotécnicas devem ser previstas a fim de garantir o funcionamento adequado dos tubos, uma vez que necessitam da capacidade resistente do solo envolvente.

2.3.1 Características mecânicas

A superfície externa corrugada confere determinada resistência ao tubo, pois concentra quantidade de material em uma região limitada (denominada nervura). Este aspecto, ao mesmo tempo, confere leveza, já que as nervuras estão espaçadas, ou seja, nos intervalos entre nervuras a quantidade de material é reduzida. Porém esta resistência do material não é suficiente em serviço, quando existem cargas aplicadas sobre o topo do tubo. Assim, é necessário proporcionar certas condições adequadas para o berço e para o recobrimento do tubo. É imprescindível dispor de uma estrutura suficientemente rígida ao redor dos tubos, para que as deformações decorrentes das cargas aplicadas no topo dos mesmos sejam absorvidas pelo solo.

Bueno e Costa (2012) demonstram que os tubos flexíveis, sob carga, defletem e mobilizam o suporte passivo do solo lateral (solo na envoltória do tubo) por possuírem baixa rigidez à flexão. Devido à sua alta flexibilidade, os tubos devem interagir com o solo adjacente para adquirir condições de suportar os esforços externos solicitantes. Esta deflexão é denominada de ovalização (Figura 1), por tratar-se de uma redução vertical, com conseqüente aumento horizontal, do diâmetro. Nesta situação, o solo tem a função de impedir maiores deflexões horizontais, resultando em uma estrutura mais resistente às cargas solicitantes. Quanto mais compacto estiver o solo na envoltória do tubo maior será a sua capacidade de suporte de cargas.

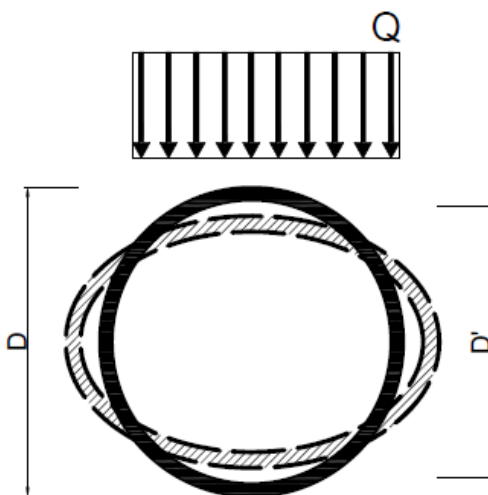


Figura 1 - Ovalização do tubo

2.3.2 Características de instalação

Segundo os mesmos autores, a envoltória compactada do tubo deve ser feita com materiais isentos de fragmentos grandes de rocha, bem como materiais com alta plasticidade. É também necessário que o processo de reaterro seja executado com o cuidado de preencher por igual os dois lados relativos ao tubo, seja em vala ou aterro. A compactação deve ser efetuada com equipamentos adequados, evitando que esforços dinâmicos atinjam os tubos gerando risco de danos e desalinhamento. Recomenda-se grau de compactação geral mínimo de 85% do Proctor normal, muito embora esse valor varie de acordo com o material utilizado. Para tanto, a ASTM D-2321 (American Society for Testing and Materials) especifica materiais para uso em envoltórias compactadas. Estes estão agrupados em Classes IA, IB, II, III, IVA, IVB, V. As descrições granulométricas seguem o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), proposto por Arthur Casagrande em 1942 (Das, 2011).

O Quadro 1 contém a descrição dos solos de classe II e III, mais interessantes para o estudo apresentado, e as características específicas quanto ao grau de compactação relativo à energia normal do método de ensaio elaborado por Proctor (Vargas, 1997).

Quadro 1 – Classes para uso em envoltórias (adaptado de Bueno e Costa, 2012)

Classe	Grupo SUCS	Compactação
II	GW, GP, SW, SP	≥ 85%
III	GM, GC, SM, SC	≥ 90%

2.3.3 Problemas relativos aos tubos flexíveis

A instalação inadequada ou incorreta dos tubos poderá levar a danos na estrutura. A região denominada por reverso, como indicada na Figura 2, tende a possuir compactação inferior às demais regiões por ser um local de difícil acesso.

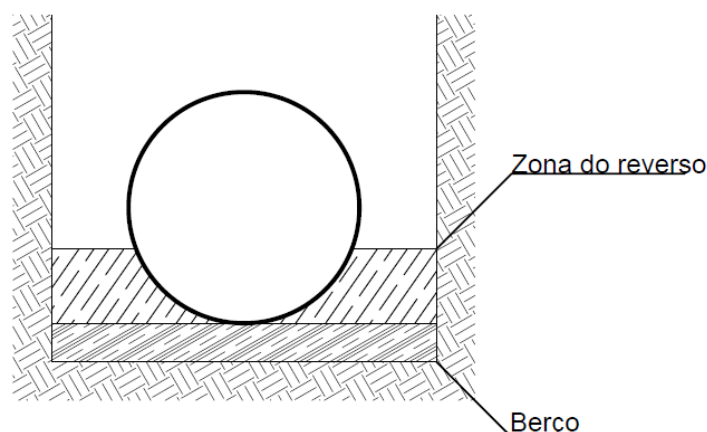


Figura 2- Detalhe da região do reverso (adaptada de Bueno e Costa, 2012)

Os procedimentos utilizados para compactar o solo não conseguem atingir o reverso adequadamente, ou apresentam dificuldade para isso. Sendo assim, a região inferior do reverso, próximo ao tubo, fica vulnerável devido a menor sollicitação da resistência passiva do solo. Consequentemente, possui menor capacidade de suporte e redistribuição de esforços, logo, resultará em maiores deflexões da tubulação.

Tendo em vista esta dificuldade, apresenta-se na sequência o método de Hidro-vibração. Uma solução possível para aumentar a densidade do material de recobrimento do tubo, inclusive na região do reverso, melhorando, assim, o comportamento mecânico da estrutura tubo-solo.

3 - COMPACTAÇÃO E HIDRO-VIBRAÇÃO

3.1 - Compactação

A compactação consiste em um procedimento utilizado para aumentar a densidade de um material granular. Como exemplo, cita-se certa quantidade de areia que, quando colocada solta dentro de um recipiente, adquire determinada forma e organização de seus grãos, que pode não ser a mais compacta. Entre os grãos existe uma grande quantidade de espaços não preenchidos pela areia. Se, porém, uma força ou movimento tal for aplicado, tendendo a aproximar os grãos uns contra os outros, a estrutura inicial será modificada e o que antes era vazio passa a ser preenchido por grão sólido.

Dessa forma, a compactação do solo pode ser adquirida por qualquer meio que provoque uma reestruturação dos grãos sólidos expulsando a matéria fluida presente nos vazios. Várias são as técnicas e equipamentos utilizados para atingir o grau de compactação exigido pelas obras de Engenharia Civil. A exemplo, rolos vibratórios, pneumáticos e placas vibratórias, utilizados em compactação de aterros.

Ralph Proctor estudou inicialmente os efeitos da compactação no solo e os demonstrou graficamente (Vargas, 1997). O aumento da densidade do solo é inicialmente proporcional à umidade e à energia de compactação. Porém, dado um certo aumento da umidade, a densidade tende a diminuir, existindo um ponto de inflexão na curva de compactação. Este ponto de inflexão é denominado umidade ótima e marca a densidade máxima atingida pelo solo para uma determinada energia. A Figura 3 ilustra o gráfico da curva de compactação para dois níveis de energia, a saber, normal e modificado.

Atualmente este é o método de ensaio utilizado para as determinações e especificações de projeto quanto à compactação.

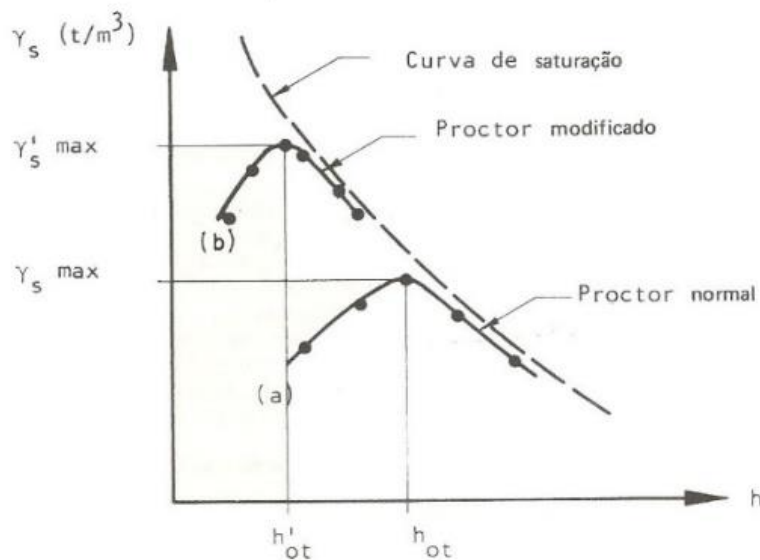


Figura 3 - Curva de compactação de Proctor (adaptado de Vargas, 1997)

3.2 - Hidro-vibração

A Hidro-vibração é uma metodologia apresentada, e assim denominada, por este autor, para o emprego de energia de vibração juntamente com injeção de água sob alta pressão ao solo, para proporcionar a redução do índice de vazios, através da expulsão do material fluido presente no solo. A água pressurizada provoca, inicialmente, a desestruturação do aparente estado de aglomeração do solo – seja ele causado pelo pisoteio da superfície ou pelo lançamento de aterro – e, posteriormente, a saturação do solo. Uma vez que os grãos do solo estão sob o efeito hidráulico, a vibração provoca a mistura da fase fluida, o rearranjo estrutural dos grãos e a expulsão da água excedente do sistema.

O objetivo desta aplicação é efetuar a densificação do material granular em uma região limitada fisicamente. O efeito é conseguido através de um equipamento improvisado, elaborado pelo autor. Trata-se de um vibrador para concreto, unido a uma haste vertical biperfurada, conectada a uma unidade pressurizadora de água. O vibrador possui um peso excêntrico, instalado dentro de uma capsula metálica em formato cilíndrico, acionado por uma mangueira conectada a um motor eletromecânico. O peso gira entorno do próprio eixo e provoca a vibração da ponta no sentido horizontal.

Espera-se que com a vibração o solo saturado seja constantemente agitado provocando uma mistura da fase fluida do sistema. Assim, a água e o ar, presentes naturalmente no solo, são misturados com água injetada, sendo, posteriormente, conduzidos à superfície pelo efeito da vibração. Com isto, os vazios poderão ser preenchidos pelos grãos de solo, reduzindo o volume e aumentando a densidade do sistema. Tendo em vista a instalação de tubos flexíveis e a região do reverso, a massa de solo saturado, com consistência fluida, irá penetrar efetivamente a região onde outrora ter-se-ia dificuldade de compactação.

Este método é basicamente semelhante à Vibro Compactação, procedimento este, que será apresentado e comparado adiante. Porém a aplicação e a estrutura do equipamento são determinadamente distintas, fato este que explica a utilização de uma nomenclatura diferente.

4 - VIBRO COMPACTAÇÃO

Wegner *et al.* (2002) definem Vibro Compactação como sendo uma técnica usada para aumentar a densidade de solos granulares, contendo no máximo de 10 a 15% de finos na composição granulométrica, usando o vibrador profundo. A vibração é conseguida através de uma haste vertical com um peso excêntrico interno estimulado a girar, em torno do próprio eixo, por um motor elétrico também instalado dentro da haste. Para que o equipamento consiga penetrar no solo é utilizado um jato de água. Após atingir a profundidade predeterminada o jato de água pode ser desligado, ou diminuído. Em seguida, o equipamento é retirado por etapas, sendo que em cada etapa permanece por um período de tempo em funcionamento. Este intervalo de tempo é necessário para fornecer ao solo a energia suficiente para compactar.

Segundo Raju (2002), o processo de melhoramento para solos granulares utilizando vibradores profundos, começou em meados de 1930, e 25 anos mais tarde, com contínuo desenvolvimento e modificação do equipamento, mudanças foram implementadas na técnica, com o intuito de tratar solos moles coesivos. O equipamento é utilizado para resolver uma grande variedade de problemas de

natureza estática, dinâmica e sísmica de fundações, compactando solos granulares (Vibro Compactação) e executando colunas de material granular em solos moles (Vibro Substituição).

A companhia Keller Holding GmbH especifica, em seu manual de procedimento, a faixa limite de aplicação para o método de vibração profunda. A Figura 4 ilustra em qual faixa o método de Vibro Compactação tem sua eficiência interessante quanto à granulometria dos solos.

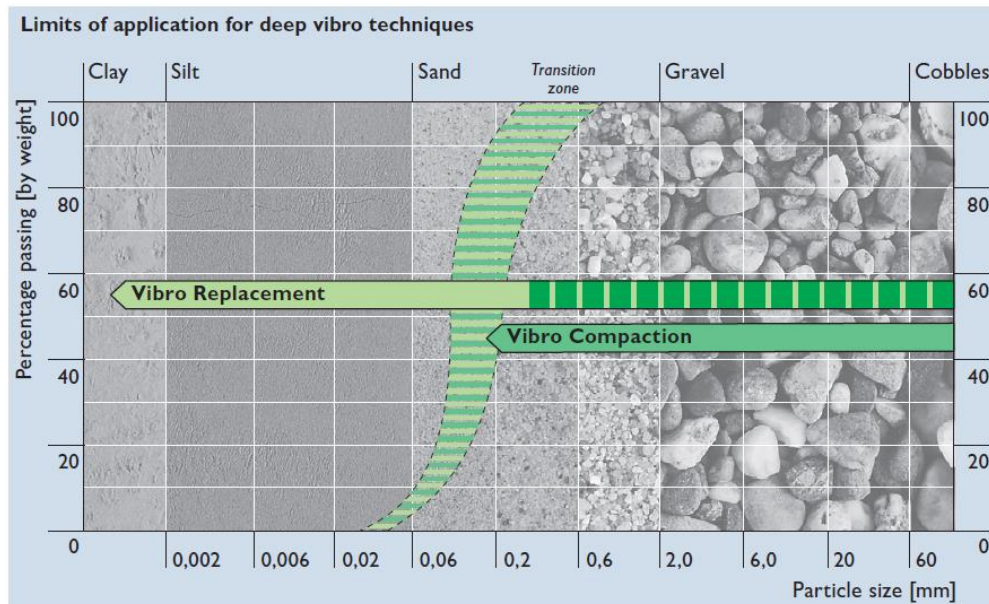


Figura 4 - Granulometrias limites para aplicação das técnicas vibratórias (adaptado de Keller - Deep Vibro Techniques)

Moseley and Kirsch (2004) relatam que a haste vibratória pesa da ordem de 15 a 40kN, com diâmetro de 30 a 50cm e comprimento de 2 a 5m, porém pode atingir profundidades maiores com auxílio de tubos de extensão. O vibrador é construído em tubos de aço com formato cilíndrico. É inserido no solo com a utilização de jatos de água sob alta pressão, sendo que o alto volume de água é mais eficiente do que a alta pressão de água.

A recomendação é de que as colunas executadas com este procedimento sigam uma sequência triangular, ou quadrada. O objetivo da execução desse método é justamente proporcionar a solos soltos, ou fofos, e solos granulares, a compactação adequada para suportar cargas de projeto sobre a superfície.

5 - METODOLOGIA

Para o estudo proposto neste trabalho foi realizada a pesquisa bibliográfica da metodologia de Vibro Compactação, bem como um ensaio de caracterização do método de Hidro-vibração apresentado pelo autor.

5.1 - Caracterização do solo

Os testes foram realizados no campus universitário da Fundação Educacional de Barretos (UNIFEB) utilizando o solo local. Após prospecção de amostras deformadas, o material foi conduzido ao laboratório da instituição para caracterização do solo. Os ensaios foram realizados conforme as especificações normalizadas pela ABNT, isto é, granulometria (NBR 7181:1984), limite de liquidez (NBR 6459:1984), limite de plasticidade (NBR 7180:1984) e índice de plasticidade. Posteriormente foi feito o ensaio de Proctor com energia normal, seguindo os procedimentos da NBR 7182:1986, para determinar a máxima densidade obtida com o ensaio para o solo estudado. Sendo assim, tanto a granulometria quanto a densidade obtida pelo ensaio de compactação darão os parâmetros de observação e análise da metodologia proposta.

5.2 - Aplicação da vibração em campo

A determinação da compactação, provocada pelo método proposto, foi efetuada com base em testes de campo. Uma vala foi escavada manualmente no solo do campus universitário, delimitada pelas dimensões de (1,20x0,80x0,50)m³ (CxLxP). Após escavação, todo o material retirado foi lançado na vala. Isto foi conduzido sem controlar as espessuras das camadas e o ganho de compactação pelo pisoteio e pelo acréscimo de pressão nas camadas inferiores. O objetivo era que todo o solo escavado pudesse ser

devolvido ao local e compactado com densidade superior, ou igual, à natural pré-existente. Em seguida, a haste e o vibrador foram posicionados em um ponto predefinido. Em funcionamento, ambos assim permanecem, por um tempo não controlado. Há necessidade de alterar várias vezes a posição do instrumento para que toda a vala possa ser atingida pela água e vibração. Embora o tempo não tenha sido controlado em nenhuma etapa da execução do ensaio, todas as etapas seguiram-se com observações visuais do procedimento.

A injeção de água foi desligada quando se percebeu a saturação do solo local, quando então a vibração teria um de seus efeitos desejados teoricamente, provocando a exsudação de água. O vibrador permanece por mais alguns minutos e é desligado. Em todo o tempo, o vibrador é movimentado verticalmente e horizontalmente, objetivando atingir todos os pontos da vala, em profundidade e extensão.

Após cessar a aplicação, o local é deixado para que a água acumulada na superfície seja evaporada e posteriormente verificada a massa específica aparente "in situ" do solo.

5.3 - Determinação da massa específica

A massa específica aparente "in situ" foi determinada a partir do ensaio de frasco de areia, normalizado pela NBR 7185:1986.

5.4 - Determinação do grau de compactação (R)

O grau de compactação é determinado a partir da equação 1 e expresso em porcentagem obtida a partir de Das (2011). O cálculo deverá ser feito utilizando como base a densidade obtida pelo processo de Proctor em laboratório.

$$R (\%) = \frac{\gamma_d (campo)}{\gamma_d (máx-lab)} \times 100 \quad [1]$$

onde $\gamma_d (campo)$ representa a massa específica aparente seca determinada no campo, com o frasco de areia, e $\gamma_d (máx-lab)$ representa a massa específica determinada pelo ensaio de Proctor.

6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

O ensaio de granulometria resultou nos dados dispostos no Quadro 2.

Os ensaios de limite de liquidez e plasticidade resultaram em 22% e 18,5%, respectivamente, obtendo-se um índice de plasticidade de 3,5%. A classificação do solo segundo o Sistema Unificado (SUCS), baseado nos dados obtidos, é dada como SW-SM, ou seja, uma areia bem graduada com presença de silte inorgânico.

As características granulométricas do solo permitem que seja utilizado como material de envoltória para a instalação de tubos flexíveis, conforme prevê a norma ASTM D-2321, enquadrando-se na Classe II. Esta classe de solos deve atingir uma compactação mínima de 85% em relação a energia normal do Proctor. Por outro lado, o solo também se enquadra nas recomendações para aplicação de vibração segundo Wegner *et al.* (2002), possuindo uma porcentagem de finos inferior a 10%. Portanto, do ponto de vista da utilização do material como envoltória para tubos flexíveis e da aplicação de vibrações, o solo amostrado no campus universitário é útil e satisfatório, como se queria demonstrar.

Quadro 2 – Valores obtidos do ensaio de peneiramento – NBR 7181:1984

Nº peneira	Amostra Inicial (g)	Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada
16 (1,2 mm)	500	0,50	0,10	0,10
30 (0,59 mm)	-	12,20	2,44	2,54
40 (0,42 mm)	-	58,90	11,78	14,32
50 (0,297 mm)	-	93,00	18,60	32,92
100 (0,149 mm)	-	261,90	52,38	85,30
200 (0,074 mm)	-	37,90	7,58	92,88
PRATO	-	35,60	7,12	100

Os valores do grau de compactação foram obtidos a partir da equação 1, apresentada anteriormente. Foi retirada amostra de solo na vala após o processo de compactação e determinada sua massa específica aparente seca. Também foi feito o mesmo procedimento para o solo natural nas proximidades da vala compactada. Em seguida pode-se calcular o grau de compactação para dois casos. No primeiro, o grau obtido em relação ao procedimento de laboratório, efetuando-se a razão entre a densidade após vibração e aquela obtida pelo método de Proctor (coluna 1 do Quadro 3). No segundo, razão entre a densidade após vibração e a densidade natural do solo no local (coluna 2 do Quadro 3). Na terceira coluna do

quadro abaixo omitiu-se o valor de grau de compactação, uma vez que pela razão o valor resultaria em 100%.

Quadro 3 - Resultados do ensaio de vibração

	Proctor	Terreno natural	Após vibração
Densidade	1840 kg/m ³	1360 kg/m ³	1390 kg/m ³
Grau de compactação	75,54%	102,20%	-

O resultado obtido com a aplicação da vibração foi de 75,54% em relação à energia normal do ensaio de Proctor, logo com uma diferença de 9,46% em relação ao exigido para compactação de envoltórias dado o solo amostrado. Uma comparação também foi realizada em relação ao terreno natural, apenas com o intuito de demonstrar um ganho de densidade em relação ao estado original antes da escavação da vala.

É importante registrar que durante o procedimento foi possível perceber a crescente dificuldade em movimentar a ponteira vibratória verticalmente e deslocá-la horizontalmente. A vibração provoca uma estrutura mais densa no entorno da ponteira, e este efeito tende a diminuir conforme se afasta dela. Também, a permeabilidade do solo vai decrescendo conforme a vibração prossegue.

Tendo em vista os resultados obtidos pelo ensaio, pode-se argumentar a favor da aplicação da técnica de Hidro-vibração como solução para compactação de solos em envoltórias de tubos enterrados. A diferença entre o estado final de compactação atingido e aquele exigido para um bom comportamento das estruturas tubulares não se deve à técnica aplicada, mas sim ao equipamento utilizado. Como declarado anteriormente, o equipamento é apenas um improvisado temporário para que a metodologia possa ser testada em escala menor no processo de instalação.

A técnica já consolidada de Vibro Compactação é argumento a favor da metodologia apresentada, tendo em vista a eficiência de sua aplicação em obras de maior porte. Nota-se que não há uma diferença teórica entre ambos os métodos, restringindo-se a diferença à aplicação em si da técnica. Novamente, a utilização de termos diferentes para dois processos semelhantes é meramente distintiva, ou seja, unicamente com intuito de distinguir entre as aplicações, uma vez que a Vibro Compactação se restringe a aplicações maiores.

Espera-se que, futuramente, novos ensaios sejam realizados a fim de promover um acréscimo de conteúdo e pesquisa, bem como levantamentos estatísticos, promovendo a difusão do procedimento e verificando as restrições da aplicação. Uma simulação da instalação de tubos poderá ser feita utilizando a técnica apresentada para monitorar o comportamento do tubo durante a instalação e posterior a ela. Há de ser verificada ainda a possibilidade de flutuação do tubo, devido ao empuxo hidrostático quando o solo estiver saturado, o que foge ao escopo do atual trabalho. Ainda, maior atenção deverá ser dada à vibração fornecida pelo equipamento, aumentando sua eficiência.



Figura 5 - Aspecto final da vala após procedimento de compactação

7 - CONCLUSÃO

A comparação teórica entre os dois métodos mostra que as diferenças são tênues e restringem-se especificamente a técnicas e preceitos de aplicação. Porém, teoricamente, os dois métodos seguem o mesmo princípio. Embora a aplicação do método de Vibro Compactação seja uma técnica de melhoria para tratamento de solos voltada a estruturas maiores, o princípio poderia ser aplicado também no tratamento de solos em envoltórias de tubulações flexíveis enterradas. O questionamento se daria, a partir daí, em relação ao equipamento cabível a esta aplicação. Além disto, a metodologia apresentada teve sua aplicação verificada pelos dados obtidos com os ensaios. Como declarado, a deficiência no resultado do grau de compactação não se deve ao método, mas sim ao equipamento utilizado para efetuar os testes, pois embora tenha sido preparado com tal intuito não está perfeitamente apto. Será necessário, portanto, efetuar correções na capacidade vibratória do sistema, aumentando sua eficiência.

REFERÊNCIAS

- ASTM D-2321 (2002). *Standard Practice for Underground Installation of Thermoplastic Pipe for Sewers and Other Gravity-Flow Applications*. American Society for Testing and Materials.
- Bueno, B. e Costa Y. (2012). *Dutos Enterrados: aspectos geotécnicos*, 2ª Ed., Oficina de Textos, São Paulo, Brasil, pp. 9, 93, 113, 210.
- Das, B.M. (2011). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*, 7ª Ed., Editora Cengage Learning, São Paulo, p. 90.
- Instituto Trata Brasil. *Situação do saneamento no Brasil – coleta de esgoto*. Disponível em <http://www.tratabrasil.org.br/saneamento-no-brasil>, acessado em abril de 2016.
- Keller Holding GmbH. *Deep Vibro Techniques*. Process Descriptions. Disponível em <http://www.kellerholding.com/download-keller-publications.html>, acessado em março 2016.
- Moseley, M.P. and Kirsch K. (2004). *Ground Improvement*, 2nd ed., Spon Press, Abingdon, England, pp. 59-61.
- NBR 6459 (1984). *Solo – Determinação do Limite de Liquidez*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 6p.
- NBR 7180 (1984). *Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – Método de Ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 3p.
- NBR 7181 (1984). *Solo – Análise Granulométrica – Método de Ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 13p.
- NBR 7182 (1986). *Solo – Ensaio de Compactação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 10p.
- NBR 7185 (1986). *Solo – Determinação da massa específica aparente "in situ", com emprego do frasco de areia*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 7p.
- NBR 8890 (2008). *Tubo de concreto de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários – Requisitos e métodos de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 30p.
- Raju, V.R. (2002). *Ground Improvement Techniques for Railway Embankments*, Technical Paper from Keller Grundbau GmbH, Offenbach, Germany, 28p. Disponível em <http://www.kellerbrasil.com.br/vibrocompactacao.php>, acessado em março de 2016.
- Vargas, M. (1997). *Introdução à Mecânica dos Solos*, Vol. 1, MAKRON Books do Brasil, São Paulo, p.47
- Wegner, R., Raju, V.R., Vetriselvan, A. (2002). *Application of Vibro Techniques for Infrastructure Projects in India*, Technical Paper from Keller Grundbau GmbH, Offenbach, Germany, 8p. Disponível em <http://www.kellerbrasil.com.br/vibrocompactacao.php>, acessado em março de 2016.