

CONTROLE TECNOLÓGICO APLICADO A EXECUÇÃO DE OBRAS DE TERRAPLENAGEM – COMPACTAÇÃO DOS SOLOS

Autor: Marcelo Bragança Belonato

Orientador: Glaucio Luciano Araujo

Curso: Engenharia Civil - Período: 10º - Área de Pesquisa: Geotecnia

Resumo: Atualmente não há grande preocupação com a terraplenagem, propriamente dita. Desta forma, as atividades são executadas indevidamente e, muitas vezes, executadas por pessoas com pouco ou nenhum conhecimento técnico, principalmente quando envolve a compactação do solo. Diante da grande importância desse processo na construção civil, o presente estudo teve como objetivo analisar as práticas de execução em uma obra de terraplanagem, verificando o controle tecnológico da obra, com foco especial nas etapas de compactação do solo realizadas nos aterros, estradas e pátios para estocagem de grandes quantidades de fertilizantes. Evitando, assim, problemas com recalques, analisando os ensaios realizados no local e comparando os resultados com os analisados em laboratório. Os bons resultados da execução de qualidade estão diretamente ligados ao “respeito” às normas e aos conhecimentos técnicos, que contribuem para o aumento da produtividade e redução de custos com equipamentos e mão de obra, respectivamente, agregando diferenciais de competitividade. A pesquisa foi realizada por meio de coletas de dados, fotos, coleta de amostras e ensaios em laboratório para a determinação da umidade ótima e compactação máxima. Foram coletadas amostras de solo de três camadas de pontos distintos e realizado ensaios pelo método do Proctor Normal e Torrão parafinado, definindo a umidade ótima e densidade máxima de cada amostra. Diante dos ensaios realizados, foi possível verificar que em alguns locais não foram executados a compactação com os índices de densidade máxima e umidade ótima. Estes desprenderam maior consumo de energia para compactar as camadas de solos ensaiadas. Nos demais locais foram identificados que o teor de umidade estava além do ponto máximo, consumindo mais horas de funcionamento de equipamentos, funcionários e consumo de diesel desnecessariamente, ou seja: Nestes locais a compactação era irrelevante, pois a mesma não acontecia. Pode-se determinar com os resultados a diminuição na margem de lucro da empresa, sendo que a mesma foi contratada por empreitada global.

Palavras-chaves: Compactação do solo, Teor de umidade; Controle tecnológico.

1. INTRODUÇÃO

A terraplenagem é um dos pontos importantes que se deve levar em consideração antes de qualquer construção, com o objetivo maior de conformar o terreno para receber um determinado projeto, seja ele a construção de uma casa, de uma rodovia, ferrovia, aeroporto, barragem, fábrica, edifício, etc. Essas obras exigem a execução de serviços de terraplenagem prévios, regularizando o terreno natural, em obediência aos projetos que se deseja implantar. É o conjunto de operações necessárias para remover a terra dos locais que se encontra em excesso, para aqueles locais em que há falta, onde podem ser ou não aproveitados, realizando uma distribuição deste material e, conforme a necessidade, uma compactação adequada.

Os solos, para que possam ser utilizados em aterros ou recomposição em obras de terraplanagem, devem cumprir com alguns requisitos, ou seja, possuir as propriedades adequadas que melhorem seu comportamento. Normalmente, na prática, o solo local não apresenta condições requeridas pela obra.

Ele pode ser pouco resistente, muito compressível ou apresentar características que deixam a desejar do ponto de vista econômico. Uma das possibilidades é tentar melhorar as propriedades de engenharia do solo local.

A compactação é um método de estabilização e melhoria do solo através de processo manual ou mecânico, visando reduzir o número de vazios do solo. (LIMA,2013)

A compactação consiste no processo mecânico ou manual que, por meio de uma aplicação repetida e rápida de cargas ao solo, conduz à diminuição de seu volume, e, portanto uma diminuição do índice de vazios e um aumento de peso volumétrico seco. Essa redução de volume é o resultado, sobretudo, da expulsão do ar dos vazios do solo, não ocorrendo, necessariamente, uma alteração no teor de água ou do volume de partículas sólidas durante a compactação. Com a diminuição dos vazios do solo, espera-se uma redução da variação dos teores de umidade, da compressibilidade e permeabilidade e um aumento ao cisalhamento e a erosão.

A compactação de um solo é a sua densificação por meio de equipamento mecânico, geralmente um rolo compactador, embora, em alguns casos, como pequenas valetas até soquetes manuais podem ser empregados. Um solo, quando transportado e depositado para a construção de um aterro, fica num estado relativamente fofo e heterogêneo e, portanto, além de pouco resistente e muito deformável, apresenta comportamento diferente de local para local (LIMA, 2013).

Os estudos geotécnicos da compactação tiveram início com a teoria de compactação desenvolvida pelo engenheiro Ralph Proctor, quem em 1933, divulgou seu método de controle de compactação e concluiu que a densidade com que um solo é compactado, sob uma determinada energia de compactação, depende do teor de umidade, do peso específico e do tipo de solo.

Deve-se destacar a diferença entre compactação do solo e adensamento. No processo de compactação há uma diminuição dos espaços vazios do solo por meio da expulsão do ar, e já no processo de adensamento ocorre de forma diferente, sendo a expulsão da água dos orifícios do solo sua principal característica.

A umidade ótima é aquela em que o solo atinge a maior massa específica aparente seca máxima. Esse ponto divide a curva de saturação em dois lados, sendo o esquerdo o ramo seco e o direito o ramo úmido ou saturado.

O teor de umidade ótima está correlacionado ao grau de compactação máxima, ponto no qual o solo possui maior resistência a recalques, falhas e erosões. Quando o solo ultrapassa o grau de umidade ótima, a resistência deste solo diminui, não atingindo um grau de compactação maior. Diante deste fato, é importante que se trabalhe sempre no ramo seco, próximo da umidade ótima, para que o solo ganhe resistência elevada, aumente a energia de compactação e diminua a pressão da água nos vazios do solo, quando sujeito a carregamento.

É de extrema importância trabalhar com a compactação do solo o mais próximo da umidade ótima, pois evita gastos desnecessários com equipamentos para atingir a compactação máxima. Sabe-se que nesta etapa o processo de compactação é lento, exigindo mais horas de funcionamento do equipamento em função do aumento do número de passadas para cada camada. No final da obra tem-se um valor significativo no orçamento do empreendimento.

O objetivo deste trabalho foi acompanhar o processo de compactação em uma obra de terraplanagem, realizado em três camadas distintas, verificando se o processo de compactação realizado atingiu o valor máximo de compactação indicado pelo ensaio de proctor normal realizado em laboratório e verificar se o processo de compactação foi realizado na umidade ótima, tendo em vista que o método de controle tecnológico utilizado pela empresa foi o do Frasco de Areia.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A compactação é um dos principais métodos para o melhoramento das propriedades mecânicas dos solos. Quando os solos são retirados de seu local natural, apresentam características próprias que variam conforme tamanho e distribuição dos grãos (areias, siltes e argilas), umidade, entre outras, e sua escolha variam conforme o objetivo de sua utilização. Quando ocorre um corte de solo em determinada área, solos remanescentes de escavações, esse material sofre uma modificação e fica em um estado relativamente fofo e heterogêneo, com pouca resistência e muito deformável, que pode variar de local para local. De acordo com Pinto (2006), a compactação tem basicamente dois aspectos: aumentar a intimidade de contato entre os grãos e tornar o aterro mais homogêneo. O aumento da densidade ou redução do índice de vazios é desejável não por si, mas porque várias propriedades do solo melhoram com o fato.

Ao escavar o solo, ele fica mais “solto” (mais espaços vazios) e passa a ocupar mais espaço. Esse efeito é conhecido como “empolamento” e é expresso em porcentagem. Se ao escavar 1 m³ de solo ele aumenta para 1,3 m³, seu empolamento é de 30%. É importante conhecer esse fenômeno para planejar quais os equipamentos deverão ser utilizados, principalmente os de transporte e também a sua produtividade.

Segundo Mattos (2014), cada tipo de solo possui uma taxa de empolamento (E). Cada material tem uma porcentagem correspondente, como exemplos: Rocha detonada - E 50%, Solo argiloso - E 40%, Terra comum - E 25%, Solo arenoso seco - E 12%. O objetivo é descobrir o Vs (volume de terra solta) para definir o transporte, o que é calculado a partir da seguinte fórmula, sendo que "Vc" é o volume medido no corte; e "E" é o empolamento.

$$V_s = V_c (1 + E)$$

O oposto do empolamento é a contração, ou seja, o quanto o solo ocupa menos volume quando compactado. Nesse caso, o volume final é inferior ao que era ocupado no corte. Assim, para executar um aterro será necessária mais quantidade de solo para preencher o mesmo volume. Para saber quanto de solo será necessário cortar para fazer um aterro e considerar redução volumétrica de 10%, devemos utilizar a seguinte fórmula:

$$V_c = V_a / C$$

Onde:

V_c = Volume de terra medido no corte

V_a = Volume compactado no aterro

C = Contração (se a redução volumétrica é de 10%, a contração é de 90%).

Para Lozano (2016), é importante conhecer a estrutura do solo, seus índices físicos e propriedades como resistência, compressibilidade, permeabilidade, entre outras, pois nos projetos são necessárias essas propriedades para o dimensionamento adequado para seus fins estruturais, bem como no aterro. É importante saber quais as condições de trabalho desse solo, pois conforme a energia de compactação e de seu teor de umidade, os aterros com mesmo solo de origem, os chamados “empréstimos”, terão solos de comportamentos diferentes, portanto, diferentes propriedades de engenharia. Ainda segundo Lozano, o comportamento de um aterro pode e, geralmente está, à mercê de um descontrole por quem o faz, pois estes conhecimentos não estão devidamente entranhados na sociedade e, pior, trazendo prejuízo e custos inconvenientes a ela.

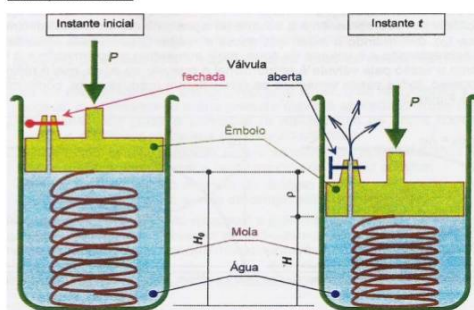
Para Pinto (2006), a compactação de um solo é a densificação por meio de equipamento mecânico, geralmente um rolo compactador, embora, em alguns casos, como em pequenas valetas, até soquetes manuais podem ser empregados. Ainda segundo Pinto, o adensamento é um fenômeno pelo qual os recalques ocorrem com a expulsão da água do interior dos vazios do solo. As argilas possuem baixa permeabilidade, e por isso é preciso acelerar o processo de saída da água dos vazios, que normalmente acontece de forma lenta.

Para entendermos como funciona o processo de adensamento e as tensões ocorridas no solo, falaremos da analogia utilizada por Terzaghi, onde se considera a estrutura sólida do solo semelhante a uma mola, onde sua deformação é proporcional a carga sobre ele aplicada. O solo saturado seria representado por uma mola dentro de um pistão cheio de água, no êmbolo, cujo existe um orifício de reduzida dimensão (representando a capilaridade do solo) pelo qual a água só passa lentamente, onde esse orifício representa a baixa permeabilidade do solo. A pressão nas molas (ou seja, nas partículas sólidas) aumenta à medida que a água escapa pelos furos (através dos vazios do solo). Com a expulsão da água intersticial, da camada compressível considerada, o volume dos seus vazios vai diminuindo e, conseqüentemente, o seu volume total. Como a camada está confinada lateralmente, a redução do volume se dá pela redução de altura. Esta redução de altura é o que se denomina recalque por adensamento.

Figura 1 – Analogia Mecânica de Terzaghi

Adensamento de argilas moles

Analogia Mecânica



Fonte: <http://pt.slideshare.net/mackenzista2/mec-solo-ms>

No caso da camada de argila, e de acordo com o mecanismo anteriormente descrito, a variação de altura dessa camada denomina compressão primária ou adensamento propriamente dito. A saída da água indica que há redução dos índices de vazios, ou seja, há deformação da estrutura sólida do solo.

Quando se trata de terrenos muito permeáveis, como as areias e os pedregulhos, o processo de adensamento não apresenta-se como descrito, pois a pressão efetiva é praticamente igual à pressão aplicada e, conseqüentemente, as deformações apresentam-se de maneira muito rápida. Tais deformações explicam-se simplesmente como devidas a um reajuste de posição das partículas do solo, daí serem, em muito maior grau que nas argilas, irreversíveis as deformações nos terrenos permeáveis.

De acordo com Pinto (2006), a teoria de adensamento Unidimensional de Terzaghi baseia-se nas seguintes hipóteses: 1) O solo é totalmente saturado; 2) A compressão é unidimensional; 3) O fluxo d'água é unidimensional; 4) O solo é homogêneo; 4) As partículas sólidas e a água são praticamente incompressíveis perante a compressibilidade do solo; 5) O solo pode ser estudado como elementos infinitesimais, apesar de ser constituídos de partículas e vazios; 6) O fluxo é governado pela Lei de Darcy; 7) As propriedades do solo não variam no processo de adensamento e; 8) O índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva durante o processo de adensamento.

As três primeiras hipóteses indicam que a teoria se restringe ao caso de compressão edométrica, com fluxo unidimensional, e a solos saturados. As hipóteses de (4) a (7), são perfeitamente aceitáveis. A hipótese (8), a rigor, não se verifica, pois, a medida que o solo adensa, muitas propriedades variam. A permeabilidade, por exemplo, diminui conforme o índice de vazios, também diminui. A hipótese (9) foi introduzida para permitir a solução matemática do problema que, sem ela, é muito complexa. Esta hipótese permite associação do aumento da tensão efetiva e a dissipação de pressão neutra, ao desenvolvimento dos recalques de maneira simples, por um parâmetro fundamental no desenvolvimento da teoria, que é o grau de adensamento. O objetivo da teoria é determinar, para qualquer instante e em qualquer posição da camada que está adensando, o grau de adensamento, ou seja, as deformações, os índices de vazios, as tensões efetivas e as pressões neutras correspondentes.

Os vazios em mecânica dos solos são os espaços deixados entre o contato das partículas devido à particularidade de cada elemento, conforme sua

granulométrica. Ou seja, é a determinação das dimensões das partículas do agregado e de suas respectivas percentagens de ocorrência.

É importante ressaltar a importância de um bom domínio de conhecimento das técnicas corretas pelos envolvidos em obras de aterro e com isso trazer um alto desempenho para a execução da obra, mitigando as consequências de prejuízos e custos, principalmente por parte dos supervisores e encarregados. Deve-se ter pleno conhecimento da finalidade que está sendo construído o aterro em obra de terraplanagem, seja para a formação de taludes, subleito de pisos e pavimentação, barragens, muros de arrimo ou fundações de estruturas, para que o produto final esteja de acordo com as boas normas e práticas de engenharia.

A compactação é empregada em diversas obras de engenharia, como aterros para diversas utilidades, as camadas construtivas dos pavimentos, a construção de barragens de terra, preenchimento com terra do espaço atrás de muros de arrimo e reenchimento das inúmeras valetas que se abrem diariamente nas ruas das cidades. O tipo de obra e de solo disponível vai ditar o processo de compactação a ser empregada, a umidade em que o solo deve se encontrar na ocasião e a densidade a ser atingida, tendo como objetivos reduzir futuros recalques, aumentar a rigidez e a resistência do solo, reduzir a permeabilidade (PINTO, 2006).

O início dos estudos da técnica de compactação deu-se em 1933, quando o engenheiro norte americano Ralph Proctor publicou suas observações sobre a compactação em aterros, mostrando que, conforme a quantidades de golpes que uma determinada camada de solo sofria, e a quantidade de água presente neste solo, conseguiria uma significativa redução da quantidade de vazios presentes neste solo. Segundo Pinto (2006), Proctor mostrou que quando se compacta com uma umidade baixa, o atrito entre as partículas é muito alto e não permite uma significativa redução dos vazios. Já para umidades mais elevadas, a água provoca certa lubrificação entre as partículas, deslizando entre si e acomodando num arranjo físico mais compacto.

Na compactação, a quantidade de partículas e a quantidade de água não sofrem alteração, e o aumento da massa específica realiza a eliminação do ar dos vazios do solo. Quando a umidade não é muito elevada, a saída do ar é facilitada devido o ar encontrar-se na forma de canalículos intercomunicados. A água diminui o atrito das partículas e os canalículos permitem um aumento da massa específica quando a umidade é maior. A partir de certo ponto, devido ao grau de saturação do solo, com alto teor de umidade, a compactação não consegue expulsar o ar dos vazios e este fica ocluso (envolto por água). Portanto, há um determinado teor de umidade, denominado umidade ótima.

O Ensaio de Proctor foi padronizado no Brasil pela ABNT (NBR 7.182/86). Em sua última revisão, esta norma apresenta diversas alternativas para a realização do ensaio.

A natureza do solo influencia nos valores do teor de umidade ótima e no peso específico aparente seco máximo. Um mesmo solo, quando compactado com energias diferentes, apresentará valores de peso específico aparente seco máximo maiores e teor de umidades ótimas menores. Ao tentar-se compactar o solo, o esforço de compactação será mais ou menos efetivo, conforme a granulometria e a plasticidade.

Quando o solo se encontra com umidade abaixo da ótima, a aplicação de maior energia de compactação provoca um aumento de densidade seca, mas quando a umidade é maior do que a ótima, maior esforço de compactação, pouco ou nada provoca o aumento da densidade, pois não consegue expelir o ar dos vazios. Isso ocorre também no campo. A insistência da passagem de equipamento compactador, quando o solo se encontra muito úmido, faz com que ocorra o fenômeno vulgarmente conhecido como “borrachudo”: o solo se comprime na passagem do equipamento para, logo a seguir, se dilatar, como se fosse uma borracha, o que se comprime são as bolhas de ar ocluso Pinto (2006).

Os solos geralmente são compactados pelo efeito de alguns esforços, tais como pressão (compressão), amassamento, vibração, impacto e, em muitos casos, pela combinação de vários esforços. Um dos equipamentos mais utilizados são os rolos compactadores, que além do peso próprio do equipamento, em alguns casos eles são também munidos de placas vibratórias, impulsionadas por sistemas hidráulicos, onde se analisa a quantidade de passadas necessárias para a compactação de cada camada. Geralmente as camadas a serem compactadas possuem alturas que variam conforme o tipo de solo.

A compressão consiste no processo de aplicação de uma força vertical, proveniente do elevado peso próprio do equipamento, gerando uma compressão na camada superficial do solo. O amassamento é a combinação de uma força vertical aplicada com um componente horizontal devido o fato dos efeitos dinâmicos serem proporcionados pela rotação dos eixos oscilantes. Essa conjugação de forças provoca uma compactação mais rápida, economizando o número de passadas do equipamento. A vibração consiste numa força vertical aplicada repetidamente, com frequências elevadas, superiores a 500 golpes por minuto. Já no impacto acontece uma ação semelhante, porém com baixa frequência de aplicação. Em cada processo existe um tipo de equipamento apropriado à compactação, onde são empregadas diversas formas de energia.

2.1. Equipamentos utilizados na execução da terraplanagem e compactação do solo.

Figura 2 – Escavadeira Hidráulica



Aplicada para escavações em geral, tem a função principal de efetuar cortes e em aterro e desaterro, conformação de taludes, carregamento de caminhões. É um equipamento com alta produtividade.

Figura 3 – Demais equipamentos, como Motoniveladora, Caminhão Basculante, Caminhão Pipa, Trator com Grade, e Rolo Compactador



Na motoniveladora a lâmina central permite o espalhamento de material e o nivelamento do terreno em diferentes inclinações. Os escarificadores na parte traseira do trator permitem desagregar solos mais rígidos.

O caminhão basculante é utilizado para transportar materiais diversos, dentro e fora do canteiro de obras. É de extrema importância, para grandes obras, principalmente quando não se há um local perto da área de corte para despejo do material retirado.

O caminhão pipa tem a função de umedecer o solo, tanto para diminuir a poeira, devido ao movimento de veículos nos trechos, quanto fazer com que o material atinja a umidade ótima de compactação. Também tem outras funções, como lavar equipamentos e abastecer com água tanques e reservatórios.

O trator de pneus, equipado com grade de arar, tem por finalidade fazer a mistura do solo durante o tratamento, fazendo uma homogeneização do material, principalmente durante a passagem do caminhão pipa.

O rolo compactador é um equipamento fundamental para a compactação do solo, principalmente na construção de aterros, barragens e estradas. Tem por objetivo uma compactação mais profunda.

Segundo Santos (2008), os rolos compactadores, ou “cilindros vibradores”, têm tido grande desenvolvimento nos últimos anos. Atualmente é possível dispor de rolos compactadores com possibilidade de ajuste de frequência e da amplitude de vibração, maximizando o rendimento do equipamento numa gama muito diversificada de tipos de solos. Além disso, a vibração permite aumentar a eficiência da compactação em profundidade, podendo as espessuras de camada atingir 0,6 a 0,8m. Estes equipamentos têm o seu maior campo de aplicação em todos os tipos de solos granulares, incluindo as areias uniformes, que são difíceis de compactar com outros equipamentos, embora o solo fique superficialmente descomprimido, necessitando “fechar” a camada com a passagem de cilindro sem vibração.

3. METODOLOGIA

Foram coletadas amostras de três camadas compactadas, ambas de um solo silte-argiloso, usado como base e sub-base. Essas amostras foram coletadas em três pontos distintos, após a finalização de cada camada, sendo eles Armazém, Armazém +10 e Oficina, todos coletados em sacos plásticos, preservando a umidade da amostra. As camadas de solo, localizadas na área da oficina, são mais siltosas, enquanto a área escolhida para ser a armazém, no solo contém um pouco mais de argila, sendo mais consistente e resistente a recalques e erosão. Também foram utilizadas camadas de solo argiloso, tidos como empréstimo para melhoramento das áreas mais siltosas, por serem um solo mais pobre e sujeito a erosões.

Durante a preparação da amostra foi separada a quantidade de 5(cinco) Kg deste material, no qual foi seco ao ar livre, espalhado sobre uma lona preta e exposto ao sol. Após este processo, fez-se o destorroamento desta amostra, ou seja, realizado a diminuição dos torrões de solo. Em seguida esse material foi peneirado na peneira de nº 4 (4,8 mm).

O Ensaio foi realizado com o reuso de material, sobre amostras preparadas após a secagem prévia.

Para a realização dos ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos no ensaio: Bandeja metálica e mão com borracha; Peneira nº 4 (4,8mm); Balanças de precisão; Molde cilíndrico de 1000 cm³, com base e colarinho; Soquete cilíndrico; Extrator de amostras; Cápsulas para determinação de umidade; Estufa.

Na figura 4 pode-se visualizar a margem superior da rodovia BR 262 Km 13, o pátio para armazenagem dos compostos químicos da fábrica de fertilizantes e, na margem esquerda, a localização das futuras instalações. Foi contratada uma empresa terceirizada para a realização das etapas de terraplenagem, a qual concedeu espaço para a coleta de amostras e dados.

Figura 4 – Imagem de satélite antes do início das obras de terraplanagem



Fonte: Google Earth

Foram realizados ensaios de Proctor Normal nos solos utilizados para compor cada uma das camadas, tendo em vista que o mesmo foi padronizado no Brasil pela ABNT (NBR 7182/86). Por meio deste ensaio, foram traçadas curvas de compactação, especificando o valor de umidade ótima para a compactação de cada camada.

Para a realização do ensaio, uma porção de solo com a umidade bem uniformizada, é colocada num cilindro padrão (10 cm de diâmetro, altura de 12,73 cm, volume de 1.000 cm³). A porção de solo, depois de compactada, deve ocupar um terço do cilindro. Esta compactação é realizada por meio de 26 golpes de um soquete padronizado, com massa de 2,5 kg e caindo de 30,5 cm.

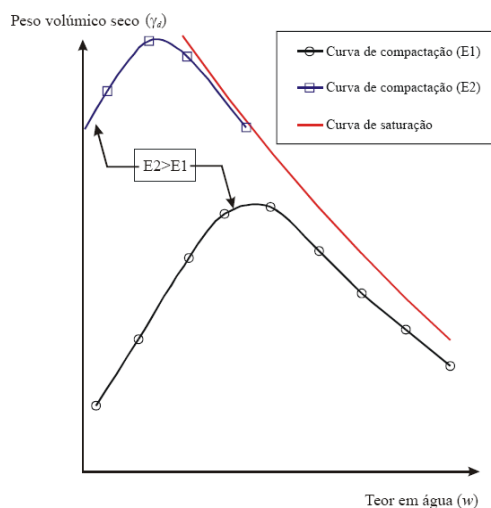
Anteriormente, eram utilizados 25 golpes, mas a alteração da norma para 26 golpes foi feita para o ajuste de energia de compactação, ao valor de outras normas internacionais, levando em conta que as dimensões do cilindro padronizado no Brasil são um pouco diferentes das demais. A porção do solo compactado deve ocupar cerca de um terço da altura do cilindro. O processo é repetido mais duas vezes, atingindo-se uma altura um pouco superior à do cilindro, o que é possibilitado por um anel complementar, acerta-se o volume raspando o excesso, Pinto (2006).

Ao realizar-se a compactação de um solo, sob diferentes condições de umidade e para uma determinada energia de compactação, obtém-se uma curva de variação dos pesos específicos aparentes secos (γ_d) em função do teor de umidade (w). Esta curva é chamada de curva de compactação (Figura 5).

Inicialmente o peso específico aparente seco cresce com o aumento do teor de umidade até atingir um máximo, e depois decrescem os valores, mesmo que crescente o teor de umidade.

A ordenada do ponto correspondente ao pico da curva é o máximo peso específico aparente seco que este solo poderá atingir, para a energia de compactação usada e precisando para isto de um teor de umidade igual à abscissa deste ponto. Estes valores só poderão ser alterados, variando-se a energia aplicada. As coordenadas do ponto máximo receberam a denominação de teor de umidade ótima (w ótima) e peso específico aparente seco máximo (γ_d máx).

Figura 5 – Curva de compactação - Efeito da Energia de Compactação



Fonte: Jaime, 2008

Utilizando-se as coordenadas cartesianas normais, traçam-se a curva de compactação, marcando-se em abscissas os teores de umidade (w), em ordenadas as massas específicas aparentes secas correspondentes (Y_s). A curva resultante deve ter um formato aproximadamente parabólico. Os dados expressos no gráfico correspondem da seguinte forma:

- Peso específico seco máximo ($Y_s \text{ máx}$) - é a ordenada máxima da curva de compactação;
- Umidade ótima (w_{ot}) - é o teor de umidade correspondente ao peso específico máximo;
- Curva de saturação - relaciona o peso específico seco com a umidade, em função do grau de saturação.
- Massa específica aparente seca máxima - Valor correspondente à ordenada máxima da curva de compactação, expresso com aproximação de $0,01 \text{ g/cm}^3$.
- Umidade Ótima - Valor da umidade correspondente, na curva de compactação, ao ponto de massa específica aparente seca máxima, expresso com aproximação de $0,1\%$.
- Curva de Saturação - Recomenda-se traçar a curva de saturação, no mesmo desenho da curva de compactação. Como mostra a figura 5.

Na bandeja metálica, adiciona-se uma parte do material peneirado e, logo após, acrescenta-se uma quantidade de água com uma proveta de vidro até o ponto em que a amostra passa a adquirir certa consistência e com melhor homogeneização, de forma a obter teor de umidade em torno de 5% abaixo da umidade ótima presumível.

Fixar o molde cilíndrico à sua base, acoplar o cilindro complementar e apoiar o conjunto em uma base rígida.

Compacta-se a amostra no molde cilíndrico em três camadas iguais (cada uma cobrindo aproximadamente um terço do molde), aplicando-se em cada uma delas 26 golpes distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada, com o soquete caindo naturalmente de uma altura de $30,5 \text{ cm}$;

Após a compactação da última camada, remove-se o colarinho e a base, aplaina-se a superfície do material à altura do molde com o auxílio de uma espátula e pesa-se o conjunto cilindro + solo úmido compactado (cilindro complementar);

Retira-se a amostra do molde com um auxílio de um extrator, e ao partir a amostra ao meio, coleta-se uma pequena quantidade para a determinação da umidade;

Desmancha-se o material compactado até que possa ser passado pela peneira nº 4 ($4,8 \text{ mm}$), misturando-se em seguida ao restante da amostra inicial (para o caso do reuso de material);

Adiciona-se água à amostra homogeneizando-a (geralmente acrescenta-se água numa quantidade da ordem de 2% da massa original selo), repete-se o processo pelo menos mais quatro vezes.

As porções ensaiadas devem ser desprezadas e dos cinco pontos obtidos no final do ensaio, dois devem estar no ramo seco, um próximo à umidade ótima, preferencialmente no ramo seco, e dois no ramo úmido da curva de compactação.

Figura 6 – Coleta das amostras para secagem em estufa



Figura 7 – Separação das amostras em laboratório

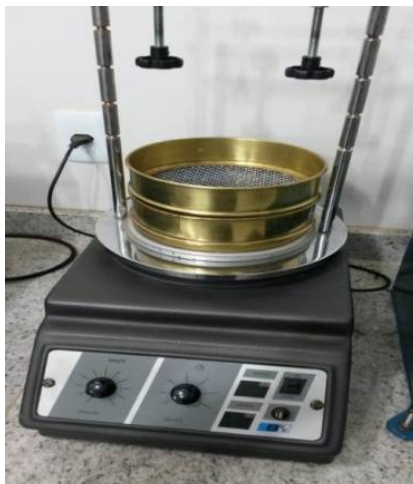


Figura 8 – Conjunto Balança precisão até 5 Kg e 500 g e cápsula para amostragem



A balança é um instrumento de extrema importância nos ensaios, por isso a necessidade de uma balança com precisão até cinco quilogramas e outra com precisão até quinhentos gramas. Na imagem podemos visualizar a identificação da cápsula e a preparação para a pesagem da amostra de material para o experimento.

Figura 9 – Peneirador elétrico



Sua principal utilização é peneirar as amostras em tamanhos diferentes por meio de vibração mecânica.

Figura 10 – Estufa Elétrica

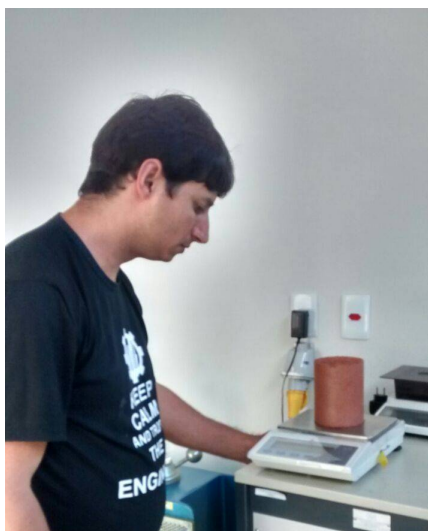


Sua principal função é a secagem das amostras em laboratório, para que possa determinar o teor de umidade de cada amostra.

Figura 11 – Extração do corpo de prova no ensaio Proctor Normal



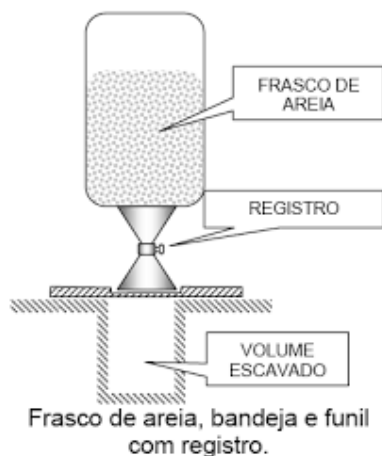
Figura 12 – Pesagem corpo de prova após ensaio Proctor Normal



A pesagem de amostras é necessária para determinar a densidade do material recolhido.

Figura 13 – Método Frasco de areia utilizado “In Situ”



Figura 14 – Esquema Frasco de areia

Fonte: Apostila Mecânica dos Solo – Unidade 10

Método da areia (ABNT/NBR 7185/86 - Determinação da massa específica aparente, in situ, com o emprego do frasco de areia), consiste em instalar em uma superfície do terreno uma bandeja com abertura circular de 15 cm de diâmetro. Através dessa abertura escava-se um buraco de 15 cm de profundidade. O solo escavado é pesado (W_t) e o volume do solo (V_t) é o volume do buraco aberto. Enche-se o buraco com areia de densidade conhecida. Sabendo o peso da areia que preencheu o buraco, pode-se calcular o volume. Dentro do frasco é colocada certa quantidade de areia lavada e peneirada, com a densidade específica para a realização dos ensaios.

Durante todas as etapas construtivas da obra de terraplanagem foram feitos ensaios com o método do frasco de areia realizado por um técnico, onde verificou-se a densidade máxima do solo, aprovando ou reprovando os ensaios de compactação. Caso o solo compactado não fosse aprovado, este material seria retirado e levado para o “bota fora” da obra.

Figura 15 – Ensaio por meio do Método do Frasco de areia “In Situ”

Figura 16 – Conjunto de balanças “In Situ”

Para a realização dos cálculos, foram usadas as seguintes fórmulas e esquemas da seguinte forma:

- Para determinar a massa específica aparente seca, utilizou-se a expressão:

$$\gamma_s = \frac{Ph \times 100}{V (100 + h)}$$

Onde:

γ_s = massa específica aparente seca, em $\frac{g}{cm^3}$

Ph = peso úmido do solo compactado, em g

V = volume útil do molde cilíndrico, em cm^3

h = teor de umidade do solo compactado, em %

- Para determinar a curva de saturação (relação entre a massa específica aparente seca e o teor de umidade, para grau de saturação do solo igual a 100%), utilizando-se a expressão:

$$\gamma_s = \frac{S}{\frac{h}{\delta a} + \frac{s}{\delta}}$$

Onde:

γ_s = massa específica aparente seca, em $\frac{g}{cm^3}$

S = grau de saturação, igual a 100%

h = teor de umidade, arbitrado na faixa de interesse, em %

δ = massa específica dos grãos do solo, determinada de acordo com a NBR 6508 ou NBR 6458, em $\frac{g}{cm^3}$

δa = massa específica da água, em g/cm^3 (considerar igual a $1,00 \frac{g}{cm^3}$)

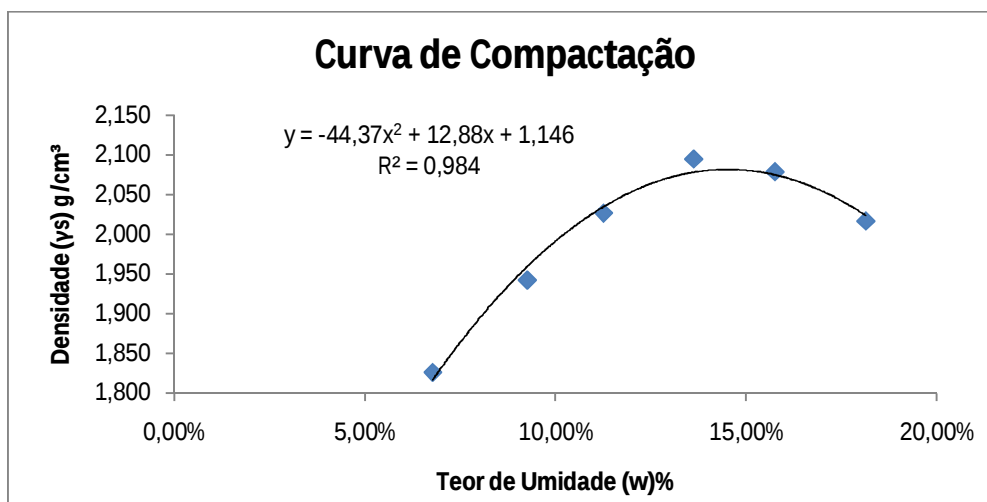
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os resultados do ensaio de Proctor normal realizados no solo utilizado para compor o aterro na área do Armazém e do Armazém +10. Os resultados da Tabela 1 são apresentados na Figura 17 em formato de gráfico.

Tabela 1 - Gráfico Ensaio Proctor Normal solo Armazém e Armazém + 10

Tabela Curva de Compactação Solos Armazém e Armazém +10	
Teor de Umidade (w)%	Densidade (γ_s) g/cm ³
6,78%	1,826
9,26%	1,943
11,26%	2,027
13,62%	2,095
15,75%	2,079
18,14%	2,017

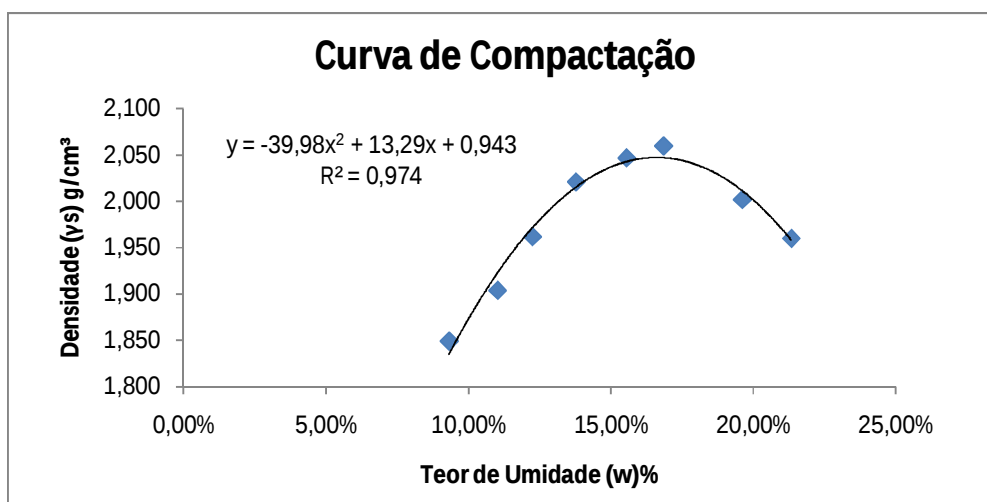
Figura 17 - Gráfico Ensaio Proctor Normal solo Armazém



Na Tabela 2 são apresentados os resultados do ensaio de Proctor normal realizados no solo utilizado para compor o aterro na área da Oficina. Os resultados da Tabela 2 são apresentados na Figura 18 em formato de gráfico.

Tabela 2 - Gráfico Ensaio Proctor Normal solo Oficina

Tabela Curva de Compactação Solo Oficina	
Teor de Umidade (w)%	Densidade (γ_s) g/cm ³
9,32%	1,849
11,02%	1,904
12,25%	1,962
13,78%	2,021
15,56%	2,047
16,85%	2,060
19,62%	2,002
21,34%	1,960

Figura 18 - Gráfico Ensaio Proctor Normal solo Armazém + 10

Na Tabela 3 são apresentadas as comparações entre os dados dos ensaios realizados em laboratório com os dados coletados em campo.

Tabela 3 – Comparação dos ensaios realizados

Tabela comparativa entre ensaios em campo e em laboratório						
Camada	γ_s Frasco Areia	γ_s Torrão Parafinado	γ_s máx	W campo	W otm	Diferença de Umidade
Armazém	1,713	1,45	2,095	16,79%	13,62%	3,17%
Armazém +10	1,713	1,50	2,095	14,00%	13,62%	0,38%
Oficina	-	1,44	2,06	21,13%	16,85%	4,28%

Diante dos ensaios realizados foi possível verificar que em alguns locais não foram executados a compactação de acordo com os índices de densidade máxima, pois não foram executados dentro do índice de umidade ótima conforme mostra a

tabela 3, desprendendo maior consumo de energia para compactar as camadas de solos ensaiadas. Quando não se trabalha a compactação no índice correto, perde-se tempo e principalmente eleva o consumo de mais horas de funcionamento de equipamentos, funcionários e consumo de diesel, ou seja, há uma perda de capital, havendo uma diminuição na margem de lucro da empresa ou mesmo, resultando em prejuízos principalmente quando a forma de contratação for por empreitada global.

Nas camadas Armazém e Oficina, a umidade trabalhada foi no ramo úmido, ou seja, o solo já estava perdendo sua capacidade de resistência e a capacidade de compactação. Com isso, o uso de equipamentos acabou sendo desperdiçado, pois o objetivo principal é trabalhar a compactação no ramo seco e sempre próximo da umidade ótima. Já na camada Armazém+10 a umidade trabalhada estava muito próxima da umidade ótima, apesar de se encontrar no ramo úmido, é considerável a margem de erro abaixo de 1%, como neste caso foi de 0,38%.

Como o método de ensaio utilizado foi o do Frasco de Areia, diante as análises dos dados, pode-se determinar que a densidade apresentada por este ensaio fosse superestimada e que, neste caso, deveriam ser realizados outros ensaios para assegurar melhores resultados.

5. CONCLUSÃO

Ao analisar os ensaios em laboratório, por meio do método do torrão parafinado e do ensaio de Proctor Normal, foi possível comparar os resultados com os ensaios realizados em “situ” pelo método do Frasco de Areia. Identificou-se que a densidade máxima não foi atingida, devido às camadas não terem sido trabalhadas na umidade ótima esperada. Consequentemente houve perda de tempo e capital, além de maior consumo de energia para compactar as camadas dos solos ensaiadas. Conclui-se haver uma diminuição na margem de lucro da empresa, pois, sendo a mesma contratada por empreitada global. O objetivo principal foi analisar e comprovar que há necessidade de melhorar o controle tecnológico e trabalhar com mais de um modelo de ensaio, visando uma margem mais segura dos dados, impactando diretamente no desenvolvimento da obra e reduzindo gastos e atraso das etapas construtivas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 12284: Áreas de vivência em canteiros de obras - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1991. 14 p.

BRASIL, Ministério do Trabalho. **Norma Regulamentadora N. 18. Considerações e Meio Ambiente do Trabalho na Indústria da Construção**. Brasília: Fundacentro, 1995. 70 p. Disponível em: < 59 <http://portal.mte.gov.br/legislacao/norma-regulamentadora-n-18-1.htm>>. Acesso em maio de 2011.

QUEIROZ, R. C. **Geologia e Geotecnia básica para engenharia civil**. São Carlos: RiMa, 2009.

LIMA, A. P. - **OBRAS DE TERRA** – Unid 02 – Compactação dos solos – Universidade Veiga de Almeida – 2013. Disponível em: <<http://image.slidesharecdn.com/02compactaodossolos-131001062658-phpapp02/95/02-compactao-dos-solos-2-638.jpg?cb=1380608831>>. Acesso em agosto de 2016.

PINTO, C. S. - **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3 Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

MATTOS, A. D. - **Como Preparar Orçamentos de Obras**. 2 Ed. São Paulo: Pini, 2014.

LOZANO, M. H. - **Revista Fundações & Obras Geotécnicas**, Pág 28-29, Ano 6, Nº 70. Editora Rudder, julho de 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 7182/86: Ensaio de compactação – Método de ensaio**. Brasil, 1986. 10 p.

JBS Construtora e Serviços – **Cálculo de Empolamento e Contração do solo**. Disponível em: <<http://www.construplena.com.br/noticia.php?id=16>>. Acesso em setembro de 2016.

Disponível em: <<http://www.civilnet.com.br/Files/MecSolos2/Compressibilidade%20e%20Adensamento.pdf>>. Acesso em setembro de 2016.

Compactação dos solos. – Professor Fabio Tonim - Disponível em: <<https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2013/06/aula-compactacao-solos.pdf>>. Acesso em setembro de 2016.

BOCCI, M. – **Costruzione Del Corpo Stradale** – 2011 – Disponível em: <http://www.univpm.it/Entra/Engine/RAServeFile.php/f/P001125/allegati_doc/05_costruzione_del_corpo_stradale1.pdf>. Acesso em setembro 2016.

BASTOS, C. – **Mecânica dos Solos** - Disponível em: <<ftp://ftp.ifes.edu.br/cursos/Transportes/CelioDavilla/Solos/Literatura%20complementar/Apostila%20FURG%20Solos/13-%20COMPRESSIBILIDADE.pdf>>. Acessado em setembro de 2016.

Mecânica dos solos – Unidade 10 **Compactação dos Solos**. Disponível em: <http://www.maquinasfix.com.br/imglayout/pdf/curva_compactacao_solo.pdf>. Acesado em setembro de 2016.

Mecânica dos solos - Disponível em: <<http://profqualificado.blogspot.com.br/2015/03/compressibilidade-dos-solos.html>>. Acessado em outubro de 2016.