

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

DOUGLAS GEOVANI KNEBEL

**CONTROLE TECNOLÓGICO DA COMPACTAÇÃO DE SOLO UTILIZANDO O
CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

DOUGLAS GEOVANI KNEBEL

**CONTROLE TECNOLÓGICO DA COMPACTAÇÃO DE SOLO UTILIZANDO O
CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco.

Orientador: Prof. Msc. Jairo Trombetta

Co-orientador: Prof. Diogo Rossetto

PATO BRANCO

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

CONTROLE TECNOLÓGICO DA COMPACTAÇÃO DE SOLO UTILIZANDO O CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA

DOUGLAS GEOVANI KNEBEL

No dia 20 de junho de 2017, às 10h20min, na Sala de Treinamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após argüição pelos membros da comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº06-TCC/2017.

Orientador: Prof. Msc. JAIRO TROMBETTA (DACOC/UTFPR-PB)

Co-orientador: Prof DIOGO ROSSETTO (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof. Msc. NORMELIO VITOR FRACARO (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Dr. NEYLYZANDRO TABALIPA (DACOC/UTFPR-PB)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pois me proporcionou forças para jamais desistir diante das dificuldades.

Aos meus pais Danilo Knebel e Maria Janete J. Knebel, pelo apoio incondicional e por não medirem esforços para que eu buscasse a realização dos meus sonhos.

A minha amada noiva Jaqueline de Conto, por estar do meu lado em todos os momentos, me fornecendo forças para ultrapassar as dificuldades e por estar caminhando ao meu lado em busca dos nossos sonhos.

Aos meus cunhados Mauricio e Jean de Conto, pelo auxílio imprescindível durante os ensaios de campo desta pesquisa.

A todos os professores que participaram desta fase de minha formação profissional, em especial aos Professores Msc Jairo Trombetta e Diogo Rosetto pela orientação neste trabalho.

RESUMO

O controle do grau de compactação do solo é fundamental para a garantia de que o solo sofra o mínimo de deformações frente à aplicação de cargas e variações de umidade. Portanto este trabalho tem por objetivo a definição da correlação entre a massa específica aparente seca do solo compactado, medida através do método do Frasco de Areia, com o índice de penetração alcançado através do ensaio do Cone de Penetração Dinâmica (DCP), visando tornar mais rápida, econômica e eficiente o monitoramento da qualidade da compactação de aterros. Para isso foi caracterizado o solo utilizado, e obtido a correlação desejada através de testes em uma vala de compactação experimental, sendo então utilizada essa relação para realizar a avaliação do grau de compactação de um aterro consolidado com este mesmo solo apenas através da utilização do DCP. Que se mostrou um método mais ágil comparado ao método do Frasco de Areia, permitindo que fossem tomados um número maior de amostras, melhorando o mapeamento da qualidade da compactação da obra.

Palavras-chave: Compactação do solo; Frasco de areia; DCP;

ABSTRACT

The control of soil compaction degree is essential to assure the minimum deformation came from loads and humidity variations. Therefore, the objective of this work is to define the correlation between the specific dry soil weight of a compacted soil through the sand replacement method and the pushing force obtained from the dynamic cone penetration test (DCP). It is intended to make soil fill compaction monitoring more efficient, economical and faster. In order to achieve that, the studied soil properties were defined. The correlation was obtained by means of an experimental compaction ditch and then this relation was applied to evaluate the soil degree of compaction of a fill made from the same soil only by the DCP method. The DCP method seemed to be faster compared to the sand replacement method which allowed to get more samples, improving the soil compaction quality mapping.

key words: soil compaction; sand replacement method; dynamic soil penetration (DCP)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de compactação	17
Figura 2 - Especificações do ensaio de Proctor	19
Figura 3 - Variação da energia de compactação	20
Figura 4 - Cone de Penetração Dinâmica	24
Figura 5 - Gráfico ensaio DCP	25
Figura 6 - Diagrama estrutural DCP	26
Figura 7 - Diagrama estrutural DCP	27
Figura 8 - Diagrama de execução do trabalho	28
Figura 9 - Localização do terreno	29
Figura 10 - Sistema de classificação HBR	31
Figura 11 - Solo nas Cápsulas para Secagem em estufa	33
Figura 12 - Solo compactado no molde com superfície regularizada	38
Figura 13 - Equipamento para execução do Método da Frigideira	40
Figura 14 – Pista escavada para testes	44
Figura 15 - Alocação dos ensaios na pista de testes	45
Figura 16 – Área superficial do aterro estudado	46
Figura 17 - Curva de compactação do ensaio de Proctor	48
Figura 18 - Relação entre DCP e Massa específica seca	51
Figura 19 - Ensaio DCP para a sondagem 1	53
Figura 20 - Ensaio DCP para a sondagem 2	53
Figura 21 - Diagrama Estrutural do DCP – Sondagem 1	54
Figura 22 - Diagrama Estrutural do DCP - Sondagem 2	55
Figura 23 - Variação da massa específica ao longo da profundidade–Sondagem 1	56
Figura 24 - Variação da massa específica ao longo da profundidade–Sondagem 2	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - CBR_{IG} apartir do Índice de Grupo (IG)	36
Tabela 2 - Determinação dos parâmetros para classificação do solo	47
Tabela 3 - Resultados do ensaio de Proctor	48
Tabela 4 - Resultados do ensaio de compactação da vala	49
Tabela 5 - Resultados médios do ensaio de compactação da vala	50
Tabela 6 – Índice de Penetração do DCP por golpe	50
Tabela 7- Dados de Penetração do ensaio DCP	52
Tabela 8 - Taxa de penetração por golpe do DCP (DN)	54
Tabela 9 - Massa específica do solo a cada golpe do DCP	55
Tabela 10 - Grau de compactação determinado em cada golpe do DCP.....	57
Tabela 11 - Grau de compactação médio das camadas - Sondagem 1 à 8	58
Tabela 12 - Grau de compactação médio das camadas - Sondagem 9 à 15.....	59
Tabela 13 - Grau de compactação médio das camadas - Sondagem 16 à 22	59
Tabela 14 - Grau de compactação médio das camadas - Sondagem 23 à 29	59
Tabela 15 - Grau de compactação médio das camadas - Sondagem 30 à 36	59
Tabela 16 - Grau de compactação médio das camadas - Sondagem 37 à 43	59
Tabela 17 - Grau de compactação médio das camadas - Sondagem 44 à 50	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
HRB	Highway Research Board
LL	Limite de Liquidez
LP	Índice de Plasticidade
IP	Índice de Grupo
IG	Limite de Plasticidade
LP	Limite de Plasticidade
CBR	Califónia Bearing Ratio
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	9
SUMÁRIO	10
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
1.2 JUSTIFICATIVA	14
2 REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO	16
2.1 ORIGEM E FORMAÇÃO DOS SOLOS	16
2.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO	16
2.2.1 Tipos de Compactação em Laboratório	18
2.2.2 Fatores que influenciam na compactação do solo	20
2.2.3 Compactação em Campo	21
2.2.4 Controle de Compactação	21
2.3 CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA	22
2.3.1 Histórico	22
2.3.2 Vantagens do uso do Cone de Penetração Dinâmica	22
2.3.3 Ensaio do Cone de Penetração Dinâmica	23
2.3.3.1.1 Interpretação dos Resultados do DCP	24
3 METODOLOGIA	28
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO	29
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.3 ENSAIOS LABORATORIAIS	30
3.3.1 Classificação do solo	30
3.3.1.1 Granulometria	31
3.3.1.2 Determinação do teor de umidade	32
3.3.1.3 Limite de Plasticidade	33
3.3.1.4 Limite de Liquidez	34
3.3.1.5 Índice de Plasticidade	35
3.3.1.6 Índice de Grupo	35
3.3.2 Ensaio de Compactação	37
3.4 ENSAIOS EM CAMPO	39
3.4.1 Teor de umidade	39

3.4.1.1 Método da frigideira.....	40
3.4.1.2 Método da estufa	41
3.4.2 Ensaio do Frasco de Areia	41
3.4.3 Ensaio do Cone de Penetração Dinâmica	43
3.4.4 Pista de teste.....	43
3.4.5 Controle de compactação do aterro	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1 RESULTADOS	47
4.1.1 Resultados de Ensaios Laboratoriais	47
4.1.2 Resultados de Ensaios em Campo	49
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
REFERÊNCIAS	64
APÊNDICE A – POSICIONAMENTO DAS SONDAGENS NO ATERRO	67
APÊNDICE B – GRAU DE COMPACTAÇÃO DA PRIMEIRA CAMADA	68
APÊNDICE C – GRAU DE COMPACTAÇÃO DA SEGUNDA CAMADA	69

1 INTRODUÇÃO

Segundo Caputo (1988) os problemas que se apresentam nos projetos e execuções de obras, podem ser divididos em dois tipos fundamentais, os que se referem a deformação do solo frente aplicação de uma carga, que abrange o estudo dos recalques das obras, e os problemas de ruptura do solo que envolve mais as questões de capacidade de carga do solo e estabilidade desses maciços.

Um solo quando é retirado e transportado até um novo local, apresenta um estado fofo e heterogêneo, e, portanto pouco resistente e muito deformável, então a compactação visa o aumento da densidade e a redução dos índices de vazios do solo, aumentando o contato entre os grãos e tornando o aterro mais homogêneo (Pinto, 2006).

Ainda segundo Pinto (2006) em aterro simples, onde não há a possibilidade de ruptura de taludes, a densidade é o elemento mais importante a se considerar, pois será a responsável pela menor deformabilidade do aterro.

Crispim (2007) afirma que os trabalhos de Proctor na década de 30, demonstraram que para a compactação de um solo, havia uma relação única entre a massa específica seca do solo e o teor de umidade de compactação para uma determinada energia de compactação.

Esta pesquisa pretende mostrar que as avaliações da qualidade da compactação de aterro, no que se refere ao grau de compactação, que são executadas através de procedimentos lentos e que exigem a paralisação temporária dos maquinários em campo, pode ser efetuada por um método de execução mais simplificada, prática e economicamente viável, o Cone de Penetração Dinâmica (DCP).

O método DCP vem sendo utilizado e aperfeiçoado desde a década de 50 para estudo de capacidade de carga de pavimentos, previsões de colapsibilidade de bases e sub-bases, qualidade e espessura das camadas de compactação em rodovias (ALVES, 2002).

O estudo será efetuado parte em laboratório para determinação dos parâmetros ótimos de compactação, assim como foram aferidos em campo a conformidade desses parâmetros e determinações de normas para execução de um aterro localizado no município de Pato Branco - PR, que será utilizado para a finalidade da construção depósito industrial em piso de concreto armado. Considerando as cargas finais que

incidiram sobre a estrutura do aterro advindas da utilização da estrutura, a qualidade e conformidade com o projeto na execução do aterro se fazem de grande importância.

Para a realização do estudo iremos primeiramente conceituar e aplicar um método tradicional de avaliação do grau de compactação do solo, o ensaio do frasco de areia, assim como o método em estudo do Cone de Penetração Dinâmica, será realizada também a caracterização do solo importado ao aterro, assim como a determinação dos parâmetros ótimos de compactação do mesmo.

Posteriormente em campo, será construída uma pista padrão, compactada de acordo com as normativas vigentes, onde serão realizados ensaios com o cone de Penetração Dinâmica e o frasco de areia, no intuito de obter a relação entre mm de penetração do DCP no solo e o grau de compactação do mesmo.

Utilizando posteriormente essa relação encontrada para realizar a aferição da compactação do aterro localizado no terreno em estudo, demonstrando a possibilidade, praticidade e confiabilidade com que a avaliação da compactação pode ser executada utilizando o Cone de Penetração Dinâmica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Aplicação do método do Cone de Penetração Dinâmica, como alternativa ao método convencional do frasco de areia, para o acompanhamento do grau de compactação de um aterro localizado no município de Pato Branco - PR.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar os métodos tradicionais de avaliação do grau de compactação em campo assim como o método do Cone de Penetração Dinâmica.
- Realizar a caracterização do tipo de solo da jazida de origem do solo utilizado na compactação.

- Verificar em laboratório a umidade que acarreta na compactação ideal para o solo estudado.
- Aplicar o método do Frasco de Areia.
- Aplicar o método do Cone de Penetração Dinâmica.
- Definir a correlação entre os métodos do Frasco de areia e Cone de penetração Dinâmica.
- Ensaiar o grau de compactação do aterro.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os trabalhos em campo precisam de um acompanhamento específico durante a execução do aterro, que executará ensaios próprios para a verificação da compactação que está sendo executada. Esse controle permite comparar os resultados do grau de compactação atingido em campo com os definidos em laboratório (Marcelli, 2007).

Crispim (2007) cabe ao engenheiro projetista de uma obra de terra, especificar qual a redução de vazios desejada para o solo ou o grau de compactação, e também os métodos para alcançá-la, incluindo a definição do processo construtivo e os métodos para controle da compactação.

De acordo com a norma DNIT 108/09 (2009), deve ser verificado o grau de compactação atingido no aterro em relação a massa específica aparente seca encontrada em laboratório, para cada uma das camadas, sendo permitida a execução da camada seguinte se esta atender ao valor mínimo requerido.

Então este trabalho busca a aplicação de um método mais fácil e prático em alternativa aos métodos usuais, com a utilização do Cone de Penetração Dinâmica para o acompanhamento da execução de compactação de solos, que acarretaria em uma economia representativa de tempo e em consequência vantagem financeira, além de viabilizar a aferição do grau de compactação a cada camada executada em um intervalo de tempo significativamente menor ao demandado pelos métodos usualmente aplicados, verificando sua conformidade com a ensaiada em laboratório e definida em projeto, não sendo necessário que o serviço de compactação seja paralisado na maioria dos casos.

Caso não sejam observadas ou respeitadas das recomendações técnicas necessárias, corremos o risco de termos um aterro não compactado adequadamente, estando sujeito a ruptura ou acomodações futuras, causando consequência sobre às estruturas sobre ele (Crispim, 2007).

Conforme Oliveira e Vertamatti (1997), para melhor analisar o solo pode ser utilizado o DCP, pois o equipamento possibilita o conhecimento real a estrutura do aterro, sem necessidade de extração de amostras, sendo útil para o controle de compactação.

O objetivo do presente trabalho será buscar uma correlação do método DCP com um método usual e eficiente para determinação do grau de compactação de obras de terra, o ensaio do frasco de freia, e aplicar essa correlação na verificação das conformidades de um aterro realizado no município de Pato Branco – PR. Demonstrando a aplicabilidade do ensaio do Cone de Penetração Dinâmica na avaliação da qualidade na compactação de solos, fator que irá reduzir o tempo para o controle e viabilizar uma conferência mais rigorosa da qualidade e conformidades com o projeto de compactação.

2 REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 ORIGEM E FORMAÇÃO DOS SOLOS

Segundo Caputo (1988), o solo é resultante do processo de intemperismo, seja por desintegração mecânica que é causada pelas ações da água, vento, temperatura ou vegetação, ou por decomposição química que é o processo no qual a rocha sofre carbonatação, oxidação, hidratação, entre outros processos nos quais a água se configura como um agente importante.

Ainda conforme Caputo (1988), a Pedologia é a ciência que se destina ao estudo das camadas superficiais da crosta terrestre, classificando os tipos de solos de acordo com suas origens, e assim conhecer suas propriedades físico-químicas.

Já para Brito (2006), os solos são materiais granulares e tem seus vazios ocupados por ar e água, e são de características variáveis ao longo do tempo, então muitas vezes é necessário proceder um melhoramento e estabilização de suas propriedades.

2.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO

Primeiramente é importante diferenciarmos compactação de adensamento, segundo CAPUTO (1988) a diferença básica é que adensamento é o processo de expulsão da água contida nos vazios do solo, enquanto compactação é a expulsão do ar apreendido nesses vazios.

Pinto (2006) define como compactação do solo o processo de densificação do mesmo, seja por meio de equipamento de rolo compressor, ou em casos de pequenas áreas até com soquete manual.

O processo de compactação de um solo é importante pois segundo Pinto (2006), quando um volume de solo é extraído de seu local natural e depositado em outro fica em um estado relativamente fofo e heterogêneo, além de apresentar baixa resistência e ser muito deformável, então a compactação é executada no intuito de aumentar o contato entre os grãos, ou seja, reduzir número de vazios e tornar o aterro mais homogêneo, acarretando assim em um aumento da densidade, que por sua vez melhora diversas propriedades físicas do solo.

E assim diminuindo recalques futuros, pelo aumento da rigidez e resistência do solo, redução da permeabilidade e conseqüentemente a variação volumétrica do solo, complementa PINTO (2006).

Como visto o objetivo da compactação é a redução do ar aprisionado nos vazios existente entre as partículas sólidas do solo, visando o aumento da sua densidade, melhorando assim suas características mecânicas de suporte de carga e estabilidade.

Segundo Caputo (1988), o engenheiro americano Proctor em 1933, efetuou uma série de ensaios de compactação, e constatou que com uma aplicação de carga constante, seja ela através de um rolo compactador em campo ou repetidos golpes de uma carga sobre o solo, que o peso específico (γ) atingido era intimamente relacionada ao teor de umidade (h) em que o solo se encontrava (Figura 1).

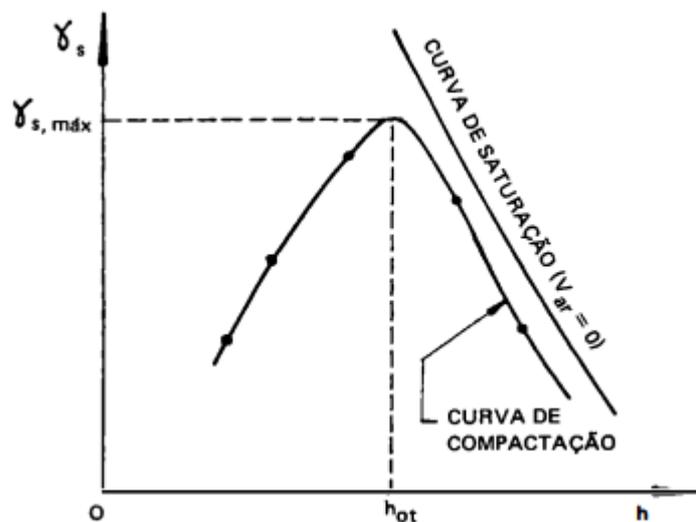


Figura 1 - Curva de compactação

Fonte: CAPUTO, p. 173, 1988.

Segundo Caputo (1988) esse comportamento é explicado pelo aumento constante do teor de umidade até um teor (h_{ot}) onde o solo apresenta uma melhor trabalhabilidade, e conseqüentemente um γ_s (massa específica aparente seca máxima) maiores e teores de ar menores, e se aumentada ainda mais o teor de umidade à uma redução do γ , pois teoricamente não é possível expulsar todo o ar aprisionado, por isso a curva de compactação não pode ultrapassar a curva de saturação para o solo em estudo.

Ou seja, até um certo teor de umidade (h_{ot}) para o solo em estudo a água atua como um lubrificante auxiliando na trabalhabilidade e assim resultando em γ_s

maiores, porém a partir deste ponto a água passa a atuar como "amortecedor", pois não é possível a expulsão de uma quantidade maior de ar da amostra, e a água por ser incompressível, aumenta o número de vazios do solo.

Por este motivo a NBR 5681 (controle tecnológico da execução de aterros em obras de edificações), define que uma vez localizado a umidade ótima de compactação em laboratório, esta deve ser executada em campo com uma tolerância máxima de 3% para mais ou para menos, ou menor conforme especificação do projeto da obra.

Outro fator importante para a compactação adequada e uniforme do solo são as alturas de cada camada de compactação, que segundo a norma do DNIT108/2009 (Departamento Nacional de Infra-estrutura Terrestre), recomenda espessuras máximas para as camadas iniciais e intermediárias em 0,3m e que as camadas finais sejam de 0,2m de espessura, enquanto a NBR 5681 que limita as espessuras das camadas em 0,3m.

Marcelli (2007) afirma que outro erro comum na execução de aterros é acreditar que é possível atingir a compactação desejada apenas compactando a última camada. E o que acontece é que apenas os 20 ou 30 cm superiores são compactados, restando as camadas inferiores prontas para recalcarem ao longo do tempo.

E de acordo com a NBR 5681, antes que seja liberada a execução da camada subjacente deve ser verificado se o grau de compactação atende a pelo menos 95% do especificado em projeto. Sendo que conforme determinação do DNIT sob a norma 108/2009, a massa específica aparente seca, deve corresponder a no mínimo 100% da encontrada em laboratório através do ensaio de Proctor.

Segundo Marcelli (2007), além dos trabalhos em laboratório como análise e classificação do solo, ensaio de Proctor para definição a umidade ótima e grau de compactação, são também é necessário o controle tecnológico através de ensaios específicos para conferência se a umidade e o grau de compactação estão de acordo com o encontrado em laboratório e definido em projeto.

2.2.1 Tipos de Compactação em Laboratório

Conforme destacam Rico e Del Castilho (1976) a compactação do solo executada em campo é um processo robusto e custoso, dificultando então estudos mais

detalhados sobre o comportamento dos solos para cada obra, neste momento que os estudos em laboratório se tornam importantes, pois são executados de maneira notavelmente de forma mais rápida e econômica.

Ainda segundo Rico e Del Castillo (1976) os ensaios de compactação em laboratório são executados basicamente em quatro vias abaixo elencadas.

- Compactação por impacto.
- Compactação estática (Pressão).
- Compactação por amassamento (similiar ao trabalho executado por um rolo compressor em campo).
- Compactação por vibração.

No Brasil a NBR 7182/86 regulamentou o ensaio de Proctor (normal, intermediário e modificado) ao exemplo da *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* como ensaio padrão para determinação da umidade ótima e massa específica atingida na compactação de uma amostra de solo. O ensaio consiste da compactação dinâmica de uma amostra de solo em um recipiente cilindro de volume aproximado 1000cm^3 , executado com 3 camadas, sendo que cada uma sofre a ação dinâmica de um soquete padronizado de 2,5 kg, que é desprendido de uma altura de 30,5 cm por 26 repetições para o ensaio de Proctor normal.

A NBR 7182 (ANBT, 1986) distingue o ensaio de compactação de Proctor nas três categorias conforme as especificações contidas na figura 2, onde a principal variável entre os métodos é a energia de compactação.

Cilindro	Características a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Nº de camadas	3	3	5
	Nº de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	5	5	5
	Nº de camadas	12	26	55
	Nº de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Figura 2 - Especificações do ensaio de Proctor

Fonte: Adaptado de NBR 7182 (ABNT, 1986, p. 06).

A umidade ótima de compactação é definida através da repetição do ensaio de Proctor para teores de umidade distintos, determinando para cada um a massa

específica gerada, traça-se então a curva de compactação no gráfico de massa específica \times teor de umidade. É desejável ainda segundo Caputo (1988) que existam 2 pontos no ramo ascendente da curva, assim como o ponto de máxima 2 pontos no ramo descendente para melhor confiabilidade.

Quanto ao ensaio de amassamento, Crispim (2007) destaca o ensaio de Harvard, que é um método de compactação de solo em miniatura, que consiste de um cilindro de 33,34mm de diâmetro e 71,5mm de altura, onde o corpo de prova é compactado em 3 camadas, aplicando-se 25 golpes de um pistão em cada uma delas, gerando um esforço de aproximadamente 180N.

Porém apesar de o ensaio de compactação de Harvard ser utilizado ocasionalmente para determinar características de compactação de solos coesivos quando tem-se apenas uma pequena quantidade de solo, este não substitui o ensaio de Proctor para o controle de compactação em laboratório afirma Lopes (2014).

2.2.2 Fatores que influenciam na compactação do solo

Segundo Ricardo e Catalani (1990) e Baptista (1976), a energia de compactação depende diretamente da pressão aplicada ao solo, umidade do solo, o número e espessura das camadas e velocidade de aplicação, independentemente de onde a compactação é executada, seja em campo ou laboratório.

Ainda segundo Ricardo e Catalani(1990), o aumento da energia de compactação, acarreta em uma redução da umidade ótima assim como o aumento da densidade máxima.

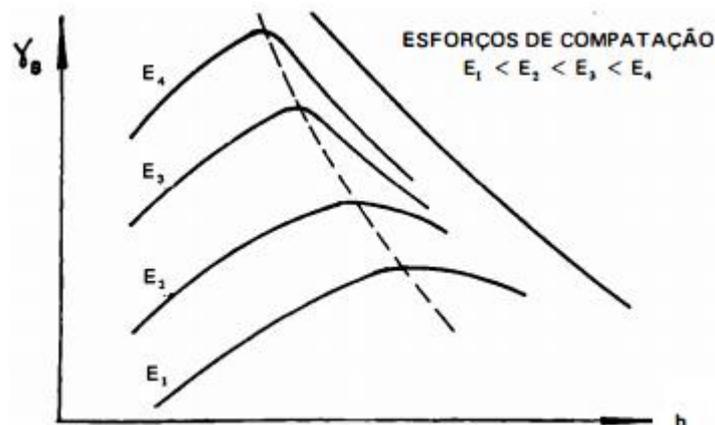


Figura 3 - Variação da energia de compactação

Fonte: CAPUTO, 1988, 6ª edição p. 176.

De acordo com a granulometria do solo temos configurações distintas de teores de umidade ótimos e densidade máxima. Em geral solos coesivos possuem elevadas umidades ótimas e baixas densidades secas, assim como baixas umidades ótimas e elevadas densidades secas são características de solos pouco coesivos (PINTO, 2006).

2.2.3 Compactação em Campo

O tipo de equipamento utilizado para a compactação do terreno varia de acordo com o tipo de solo, podendo variar de rolos lisos para solos arenosos, rolos pé-de-carneiro para solos argilosos e os pneumáticos são adaptáveis a qualquer tipo de terreno variando de acordo com especificações de projeto segundo CAPUTO (1988).

Ainda segundo Caputo (1988), são utilizados caminhões tanques com barras espargidoras para umedecimento do solo se necessário e arado para aeração o mesmo estiver com teor de umidade elevado.

Segundo a norma do DNIT 108/09 (2009), as camadas compactadas do corpo do aterro não devem exceder 0,30m, sendo que para as camadas finais não deve exceder 0,20m.

2.2.4 Controle de Compactação

Caputo (1988) define como Grau de compactação (GC) como sendo o quociente do peso específico aparente obtido em campo, pelo peso específico máximo ou de projeto obtido através de ensaios laboratoriais.

$$GC = \gamma_d^{\text{campo}} / \gamma_d^{\text{max}}$$

Segundo Santos (2008) o controle da compactação deve ser efetuado em 2 “dois” níveis, na fase executiva onde o deve se verificar a granulometria do material, o equipamento utilizado para compactação e a espessura das camadas, já após a compactação deve ser verificado se a estrutura do aterro atingiu os parâmetros definidos em laboratório.

Sendo exigido através da norma DNIT 108/2009, que a massa específica aparente seca, deve corresponder a no mínimo 100% da encontrada em laboratório através do ensaio de Proctor.

Já para as camadas inferiores a NBR 5681, define que antes que seja liberada a execução da camada subjacente deve ser verificado se o grau de compactação atende a pelo menos 95% do especificado em projeto.

A verificação do GC deve ser efetuada a cada camada compactada, sendo condicionada a liberação da execução das próximas apenas se e apenas se, o valor encontrado for igual ou superior a 100% (DNIT 108/2009).

2.3 CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA

2.3.1 Histórico

Os primeiros registros da utilização do Penetrômetro dinâmico de cone – DCP, foram na Austrália na década de 1950, onde Scala desenvolveu um equipamento portátil que denominou de Scala Penetrômetro, que devido a sua facilidade de utilização e mobilidade vem sendo empregado em projeto e avaliação de pavimentos (ALVES,2002).

Posteriormente em 1969, Van Vuuren, no Zimbábue, modificou o projeto original de Scala e obteve uma boa correlação entre o DCP e o CBR, assim como Kindermans sete anos mais tarde também observou notáveis correlações entre os métodos, o que impulsionou diversas pesquisas futuras (ALVES, 2002).

2.3.2 Vantagens do uso do Cone de Penetração Dinâmica

O DCP possui muitas vantagens, primeiramente, devido a praticidade na sua utilização, não é necessário realizar grande movimentação de terra, caracterizando o equipamento como econômico e de ensaio não destrutivo (BERTI, 2005).

Ainda segundo Berti (2005) possui vantagem em relação a método tradicional do CBR por ser mais simples de manusear e realizar o ensaio, e os estudos mostram grande confiabilidade.

E a execução do ensaio é rápida, necessita-se de apenas duas pessoas para realização e os resultados apresentam pequena dispersão afirma (ALVES, 2002).

O ensaio do CBR, que é no Brasil o parâmetro mais utilizado para dimensionamento de pavimentos, se mostrou com uma variabilidade grande nos seus resultados, ensaios efetuados repetidamente por laboratórios mostraram uma dispersão de valores de CBR de até 40%, o que pode representar uma diferença na estrutura do pavimento de 5 cm ou 10 cm (Medina apud ALVES p. 01, 2002).

A heterogeneidade de um pavimento pode ser maior do que se imagina, acarretando em dispersões de análises e conseqüentemente comprometimento da vida útil. Nesse caso o DCP se torna uma ferramenta poderosa por realizar a análise no próprio meio do pavimento, explicitando sua estrutura real, e não a média de ensaios, sendo útil assim para acompanhamento de compactação de solos (OLIVEIRA e VERTAMATI, 1997).

Porém alguns cuidados devem ser tomados na execução do ensaio, principalmente quanto aos cuidados com a manutenção do equipamento, realizando verificações das integridades das peças, principalmente a ponteira do equipamento, que com a utilização freqüente em materiais rígidos ocasiona o desgaste acelerado da mesma, sendo necessária a substituição com maior freqüência (Transportand Road Research Laboratoty, apud BERTI, 2005).

Os cuidados na execução do ensaio se dão quanto aos cuidados com a verticalidade do equipamento durante o ensaio, e a lubrificação da haste do DCP, Impedindo assim que a aderência de materiais interfira de forma significativa nos resultados dos ensaios (BERTI, 2005).

2.3.3 Ensaio do Cone de Penetração Dinâmica

O desenvolvimento do DCP surgiu da necessidade de se avaliar de forma simples e rápida, as condições do subleito de um determinado pavimento. E o seu uso vem ganhando cada vez mais adeptos no meio nacional e internacional (AMARAL, 2005).

Segundo Berti (2005) o DCP é utilizado para determinação da resistência da base e/ou subleito de estradas não pavimentadas, além de outras finalidades como, avaliar o CBR “*in situ*” de materiais e solos granulares, determinação do perfil de resistência das camadas do pavimento existente, controlar a qualidade da compactação, detectar solos potencialmente colapsáveis, entre outras finalidades.

O equipamento consiste em uma barra de aço de 16 mm de diâmetro, com uma ponteira cônica com inclinação de 60° , 20mm de base e 30mm de altura, além de um suporte para operação. A cravação ocorre através de percussão com impacto de um martelo de massa = 8 Kg, que é desprendido de uma altura de 57,5 cm, e desliza pela barra guia, e o equipamento pode ensaiar uma profundidade de até 80cm. E a leitura de profundidade de penetração é efetuada através de uma régua fixada ao equipamento, com o zero (0) coincidindo com o nível do terreno (Cantarelli e Defaveri, 2015).

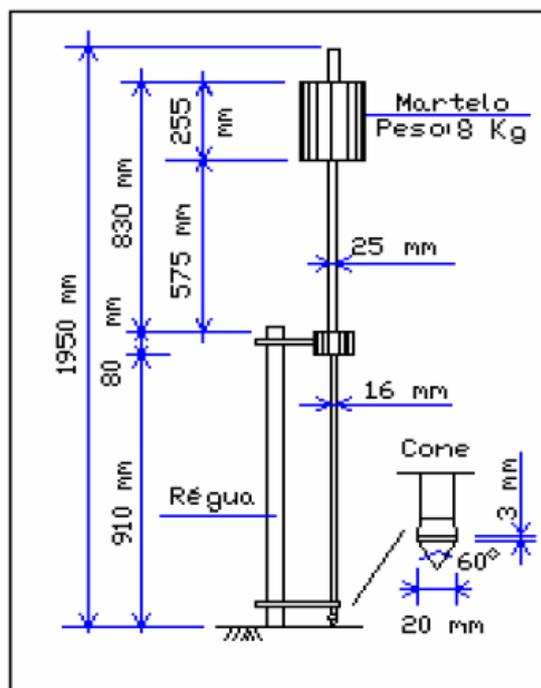


Figura 4 - Cone de Penetração Dinâmica

Fonte: ALVES, p. 09, 2002.

2.3.3.1.1 Interpretação dos Resultados do DCP

A curva gerada pelo ensaio DCP, é uma representação gráfica do número de golpes acumulado *versus* profundidade penetrada. E a inclinação dessa reta em cada profundidade representa o índice de penetração (DN, em mm/golpe), que é obti-

do pela razão entre a profundidade e a quantidade de golpes necessários para se atingir essa profundidade (ALVES, 2002).

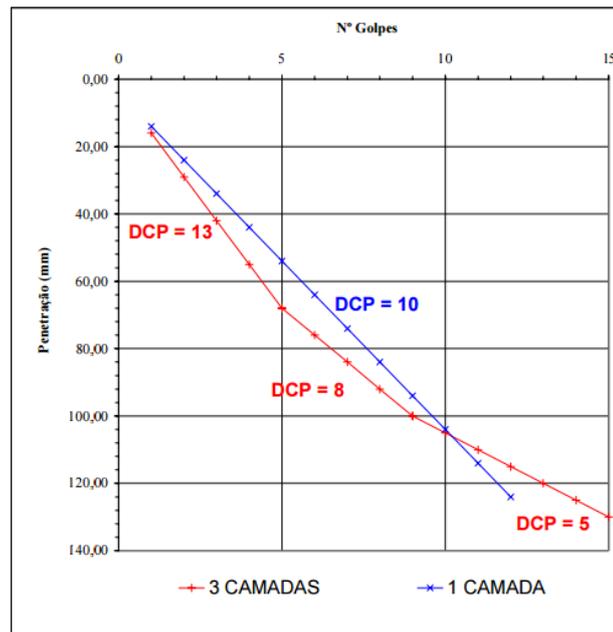


Figura 5 - Gráfico ensaio DCP

Fonte: AMARAL, p.37, 2005.

Como pode ser observado no gráfico o equipamento DCP é sensível a variações de massas específicas que pode ser notada na mudança de inclinação da reta, e assim alteração no valor do DCP/DN, o que o torna interessante para avaliação/identificação de espessuras das camadas compactadas do solo (AMARAL, 2005).

Segundo Alves (2002), derivando a curva DCP, obtemos o diagrama estrutural do solo, que é traçado com o valor do DN indicado nas abscissas e a profundidade no eixo das ordenadas, conforme figura 6. A curva indica o índice de penetração em função da profundidade.

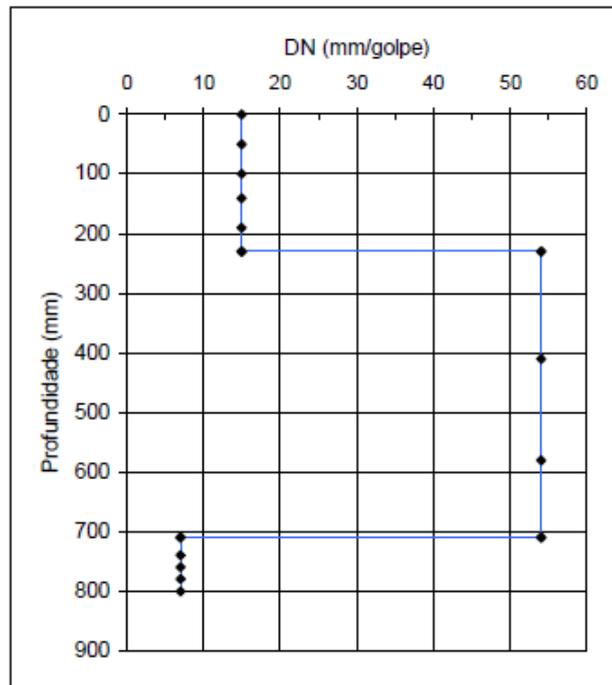


Figura 6 - Diagrama estrutural DCP

Fonte: ALVES, p.11, 2002.

Pode ser extraído desse diagrama informações como o DCP (DSN) que é o número de golpes necessários para penetrar uma certa profundidade, por exemplo DSN_{800} , é a quantidade de golpes necessários para penetrar 800mm (ALVES, 2002).

Alves (2002) cita que a curva de balanço estrutural, é extraído através do número de balanço estrutural (BNz) à uma certa profundidade (z), que constitui então o número estrutural (DSN) nessa mesma profundidade (z), que é expresso em porcentagem do número estrutural necessário para penetrar toda a profundidade que foi estudada.

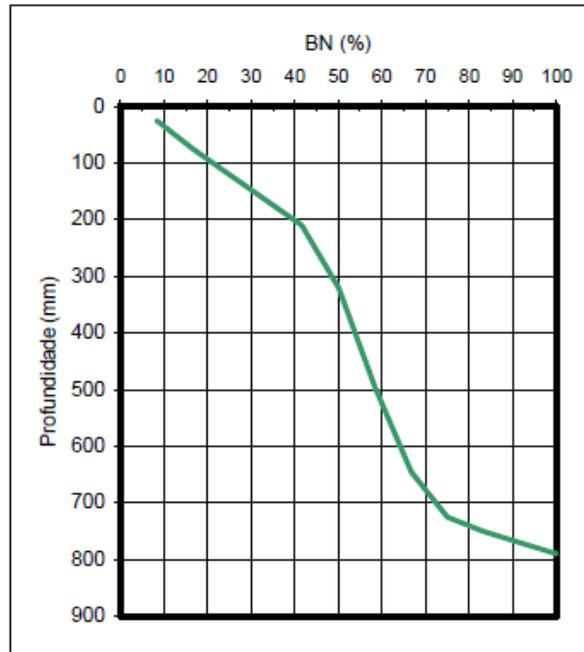


Figura 7 - Diagrama estrutural DCP

Fonte: ALVES, p.11, 2002.

Essa curva de balanço estrutural representa o quanto da carga total está sendo suportado até a profundidade analisada, por exemplo, na figura 7, na profundidade de 200mm temos $BN = 40\%$, então os primeiros 200mm do solo analisados suportam 40% da carga total considerando a profundidade analisada de 800mm (ALVES, 2002).

3 METODOLOGIA

O trabalho irá buscar a correlação entre o método do Cone de Penetração Dinâmica (DCP) e o método do frasco de areia para avaliação do grau de compactação de aterros, buscando a utilização do DCP como alternativa aos métodos convencionais para o acompanhamento do grau de compactação de um aterro localizado no município de Pato Branco - PR.

Para elaboração do trabalho foi respeitada conforme a sequência apresentada no diagrama da figura 8.

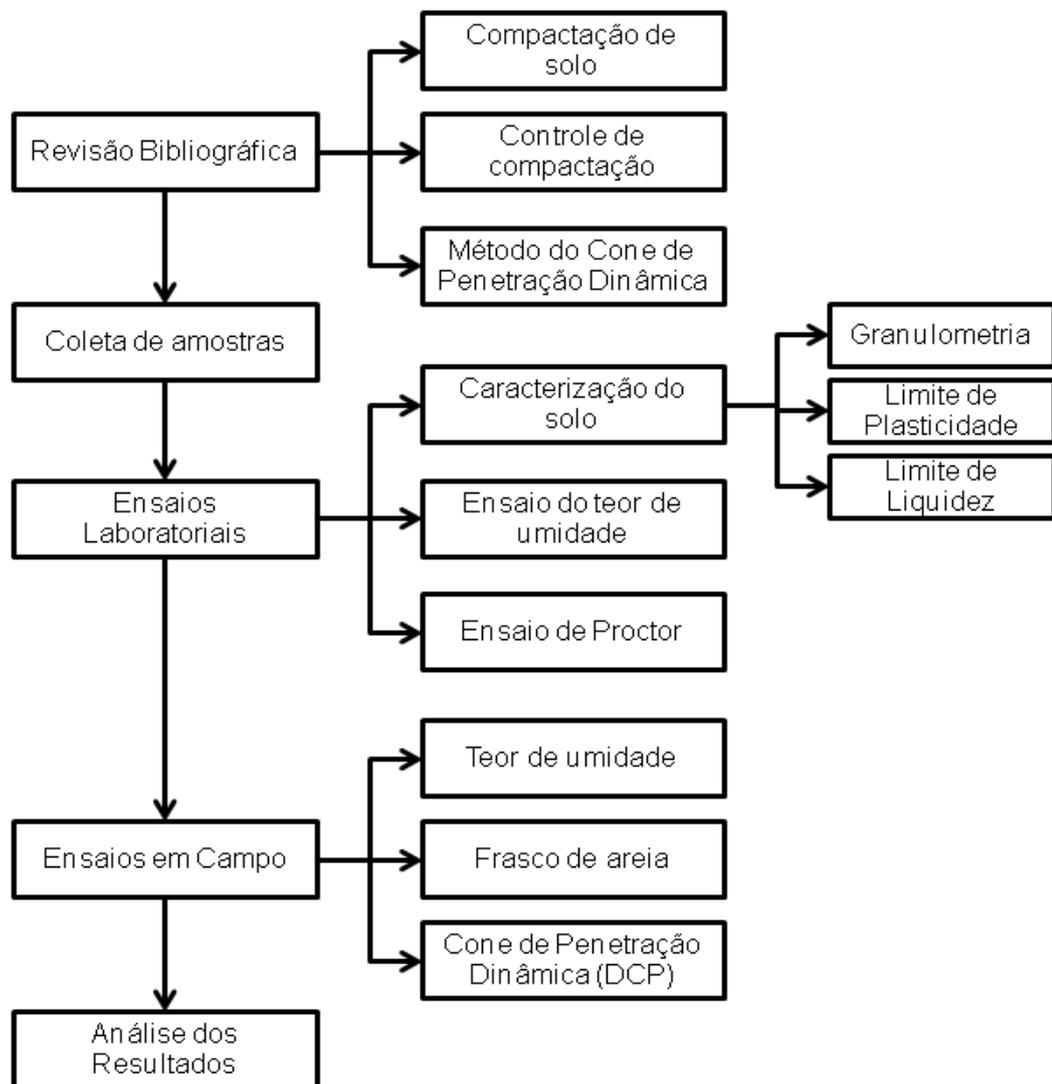


Figura 8 - Diagrama de execução do trabalho

Fonte: Autoria Própria.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

Para o estudo foi utilizado como estudo de campo um aterro realizado no município de Pato Branco no estado do Paraná, na esquina das ruas Ricardo Bortolo Tesser e Março Penso, localizada nas coordenadas geográficas $26^{\circ}13'10''S$ e $52^{\circ}41'10''W$.



Figura 9 - Localização do terreno
 Fonte: Adaptado de GoogleMaps (2015).

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa tem como base seus objetivos se enquadra como pesquisa exploratória, pois segundo Gil (2002), esse modelo de pesquisa tem por finalidade proporcionar maior familiaridade com o tema em estudo, buscando torna-lo mais explícito, através de estudos de casos ou revisões bibliográficas visando o aprimoramento de idéias e descobertas de intuições sobre o tema. Tendo em vista então que a presente pesquisa tem por objetivo a aplicação do método do Cone de penetração Dinâmica como alternativa à utilização dos métodos convencionais para o acompanhamento de compactação de solo no município de Pato Branco – PR.

Quanto ao delineamento do estudo, que segundo Gil (2002) se refere ao planejamento da pesquisa, que envolve tanto a diagramação, quanto a previsão de coleta, análise e interpretação de dados, e pode ser dividido em 2 grandes grupos

quanto ao procedimento adotado, que são as pesquisas bibliográficas ou as pesquisas documentais, ou experimentais e estudos de casos, a presente pesquisa pode ser considerada como de estudo de caso ou experimental, porém não se ignora o fato de a pesquisa possuir embasamento teórico realizado através de pesquisas bibliográficas.

Quanto à abordagem da pesquisa, ela pode ser classificada como quantitativa, que segundo Fonseca (2002), é aquela que se centra na objetividade e considera que a realidade pode ser melhor compreendida com base nas análises de dados brutos, que foram captados através de métodos padronizados e neutros.

Como primeira etapa para a realização do trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre a compactação dos solos, sobre o método do DCP (Cone de Penetração Dinâmica), e sobre o método do frasco de areia, buscando obter melhor compreensão sobre os fenômenos e métodos que envolvem o trabalho.

Posteriormente foi coletado o solo da jazida utilizada para a construção do aterro, visando a classificação do tipo de solo, determinação do grau de compactação e a umidade ótima de compactação. Então de posse dos resultados dos ensaios laboratoriais, a terceira etapa consistiu na realização dos ensaios em campo, tanto em uma vala executada para calibração do equipamento, quanto no aterro definitivo realizado no terreno.

Para a quarta etapa e final realizamos o processamento dos dados, gerando uma curva com a profundidade de penetração do DCP x massa específica obtida com o ensaio do frasco de areia, podendo assim correlacionar os métodos.

3.3 ENSAIOS LABORATORIAIS

3.3.1 Classificação do solo

Para a classificação do solo optou-se pelo sistema HRB (Highway Research Board), que segundo Caputo (1988), consiste em analisar o solo segundo sua granulometria e plasticidade, e então enquadrá-lo nas categorias de “solos granulares” que compreendem os grupos A-1, A-2 e A-3, ou “solos finos” nos grupos A-4, A-5, A-6 e A-7 (Tabela 1).

Classificação Geral	Solos granulares P ₂₀₀ < 35%							Solos Silto-Argilosos P ₂₀₀ > 35%			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Subgrupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
P ₁₀	<50	≡	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P ₄₀	<30	<50	>50	-	-	-	-	-	-	-	-
P ₂₀₀	<15	<25	<10	<35	<35	<35	<35	<35	<35	<35	<35
LL	-	-	-	<40	<40	<40	<40	<40	<40	<40	<40
IP	<6	<6	NP	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Índice de grupo (IG)	0	0	0	0	0	<4	<4	<8	<12	<16	<20
Tipo de material	Fragmentos de terra, pedregulho e areia		Areia fina	Pedregulhos e areias siltosas ou argilosas				Solos siltosos		Solos argilosos	
Classificação do subleito	Excelente a bom						Regular a mau				
<p>NOTAS:</p> <p>(1) - P₁₀, P₄₀ e P₂₀₀ indicam, respectivamente, as porcentagens que passam nas peneiras números 10(2mm), 40 (0,42mm) e 200 (0,074mm).</p> <p>(2) - LL e IP referem-se a fração passando na peneira #40.</p> <p>(3) - Para o subgrupo A-7-5: IP < LL – 30 e para o A-7-6: IP > LL – 30.</p> <p>(4) - A identificação é feita da esquerda para a direita, razão por que o A-3 é colocado antes do A-2, sem que isso signifique superioridade daquele sobre este.</p>											

Figura 10 - Sistema de classificação HBR

Fonte: Adaptado de Caputo (1988).

Para a realização da classificação do solo utiliza-se além da granulometria do solo, também índices como o limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade e Índice de grupo.

3.3.1.1 Granulometria

É a medida da textura de um solo, ou seja, é a medida de tamanho relativo e proporção dos grãos que constituem a fase sólida dos solos (ALMEIDA, 2005).

Segundo CAPUTO (1988), a análise granulométrica para um solo que possui partículas com dimensões maiores que 0,074 mm, é feita pelo processo de peneiramento.

A execução do ensaio de granulometria segue as determinações da NBR 7181/2016, onde a seleção da amostra de solo deve ser efetuada conforme determinações da NBR 6457/86.

3.3.1.2 Determinação do teor de umidade

Caputo (1988) define a umidade do solo como sendo a razão entre o peso de água e de partículas sólidas contidas em uma amostra de solo.

Para a determinação do valor do teor de umidade (h) conforme a NBR 6457 (ABNT, 1986) Amostras de solo, Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, primeiramente é determinado a massa da amostra úmida, sendo posteriormente a mesma amostra levada à estufa para secagem e então verificado a massa seca, mantendo sempre a amostra no mesmo recipiente, de posse desses valores utiliza-se a equação 1 para cálculo do teor de umidade em porcentagem.

$$h = \frac{M1-M2}{M2-M3} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

M1 é a massa da amostra natural + recipiente, em gramas (g).

M2 é a massa do solo seco em estufa + recipiente, em g.

M3 é a massa do recipiente, em g.

Para a execução do ensaio foram necessárias cápsulas metálicas com tampa (Figura 11), estufa com regulagem de temperatura, e balanças com capacidade para 0,2 kg, 1,5 kg e 5 kg, com precisões de 0,01 g, 0,1 g e 0,5 g, respectivamente.



Figura 11 - Solo nas Cápsulas para Secagem em estufa

Fonte: Aatoria própria.

3.3.1.3 Limite de Plasticidade

Caputo (1988) define como a porcentagem de teor de umidade para o qual o solo começa se fraturar quando se tenta, com ele, moldar um cilindro de 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, que representa a passagem do solo do estado plástico para o semi-sólido.

O ensaio é padronizado pela NBR 7180 (ABNT, 1984), Solo – determinação do limite de plasticidade, que consiste em encontrar o teor de umidade para o início da fragmentação na tentativa da moldagem do cilindro de 3mm de diâmetro e 10cm de comprimento, assim como definido por Caputo, 1988.

Para a realização do ensaio são necessários os seguintes materiais:

- Estufa com controle de temperatura;
- Espátula metálica;
- Cápsula de porcelana;
- Cápsula metálica;
- Balança com capacidade de massa de 200g e resolução de 0,01g;
- Gabarito de 3mm de diâmetro e 10cm de comprimento;
- Placa de 30x30cm em vidro esmerilhado;

Após a preparação da amostra conforme a NBR 6457 (ABNT, 1986) Amostras de solo, Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização,

com secagem prévia, coloca-se certa quantidade da amostra no recipiente de porcelana e adiciona-se água destilada em pequenos incrementos, homogeneizando com o auxílio da espátula metálica durante 30 min por se tratar de um solo argiloso.

Após esse procedimento utilizando aproximadamente 10g de material, inicia-se a tentativa de conformação do cilindro conforme o molde, utilizando a palma das mãos sobre a placa de vidro, se houver a fissuração do solo antes de atingir a espessura de 3mm, o material é levado novamente a capsula, adicionado água destilada e homogeneizado por 3 minutos novamente, tornando a efetuar o ensaio até que ocorra a fissuração da amostra apenas quando formado o cilindro de 3mm de espessura e 10cm de comprimento.

Quando atingido a característica toma-se uma amostra do cilindro moldado que é colocado em uma cápsula metálica, onde é aferida a massa do conjunto e então levado até a estufa até total secagem do material para determinação do grau de umidade, conforme definido no item 3.3.1.1 deste trabalho.

3.3.1.4 Limite de Liquidez

Caputo (1988) define como o limite de liquidez (LL), o teor de umidade em que o solo atinge o estado plástico, perdendo então sua capacidade de fluir porém mantendo sua capacidade de ser moldado.

O ensaio é regulamentado pela NBR 6459 (ABNT, 1984) e a aparelhagem necessária é:

- Estufa com controle de temperatura;
- Cápsula de porcelana;
- Espátula metálica;
- Aparelho de Casagrande;
- Cinzel;
- Balança com capacidade para 200g, e precisão de 0,1g.
- Colher;
- Almofariz;
- Peneira nº40 (0,42mm);

O procedimento para execução consiste em adicionar a amostra de solo de aproximadamente 200g, passante na peneira de 0,42mm, em um almofariz de por-

celana, onde será adicionada água destilada suficiente para que durante o ensaio a ranhura se feche com 35 golpes aproximadamente, então homogeneiza-se vigorosamente a amostra por 30 minutos, posteriormente o solo é levado até a concha do aparelho de Casagrande, onde é regularizada de forma que a espessura na parte central seja de 10mm.

Então através da passagem do cinzel no centro da amostra, abre-se uma ranhura, e iniciamos então o golpeamento da concha girando a manivela lateral do equipamento a uma razão de 2 voltas por segundo, anotando o número de golpes que foram necessários para causar o fechamento da ranhura por um comprimento de 13mm, e imediatamente coletar uma porção dessa amostra em uma capsula metálica e enviar a estufa para o procedimento de medição do teor de umidade.

O ensaio é repetido por mais quatro vezes, de modo a se obter mais pontos de teor de umidade x número de golpes, para encontrar uma curva, e se obter que teor de umidade a ranhura do cinzel se fecha com 25 golpes, representando então o limite de liquidez do solo.

3.3.1.5 Índice de Plasticidade

Conforme Caputo (1988), o Índice de Plasticidade (IP) representa o quanto plástico é o solo, assumindo valores maiores para argilas e menores ou nulos para areias.

Para a quantificação do IP é definido pela NBR 7180 (ABNT, 1984) pela equação 2:

$$IP = LL - LP \quad (2)$$

Onde todos os valores são expressos em porcentagem (%).

3.3.1.6 Índice de Grupo

É denominado Índice de Grupo, um valor numérico, que varia de 0 a 20. E através deste número é possível determinar a capacidade de suporte do solo para a pavimentação. Sendo que quanto menor o IG, maior o valor do CBR_{IG} (BRASIL, 2006).

Calculado através da seguinte expressão (SENÇO, 1997):

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd \quad (3)$$

onde,

a = % de material que passa na peneira nº 200, menos 35. Se a % obtida nesta diferença for maior que 75, adota-se 75; se for menor que 35, adota-se 35. (a varia de 0 a 40);

b = % de material que passa na peneira nº 200, menos 15. Se a % obtida nesta diferença for maior que 55, adota-se 55; se for menor que 15, adota-se 15. (b varia de 0 a 40);

c = Valor do Limite de Liquidez menos 40. Se o Limite de Liquidez for maior que 60, adota-se 60; se for menor que 40, adota-se 40 (c varia de 0 a 20);

d = Valor de Índice de Plasticidade menos 10. Se o índice de Plasticidade for maior que 30, adota-se 30; se for menor que 10, adota-se 10 (d varia de 0 a 20).

Sendo que a partir do valor do Índice de Grupo é possível determinar o valor do CBR_{IG} , através da tabela 1 (SOUZA, 1981).

Tabela 1 - CBR_{IG} a partir do Índice de Grupo (IG)

Índice de Grupo (IG)	CBR_{IG}
0	20
1	18
2	15
3	13
4	12
5	10
6	9
7	8
8	7
9 a 10	6
11 a 12	5
13 a 14	4
15 a 17	3
18 a 20	2

Fonte: Autoria própria

3.3.2 Ensaio de Compactação

O método utilizado para a preparação da amostra para o ensaio de compactação foi com secagem prévia da amostra até a umidade higroscópica, conforme definido pela NBR 6457 (ABNT, 1986).

Que consistem em secar uma amostra do material ao ar, até próximo da umidade higroscópica, desmanchar então os torrões tomando cuidado para não haver quebra de grãos. Posteriormente realiza-se a separação do material de ensaio utilizando o separador de amostras, verifica-se então se o material passa integralmente pela peneira de 4,8mm.

Foi utilizado o ensaio de compactação normal de Proctor, regulamentado pela NBR 7182 (ABNT, 1984) Solo – Ensaio de Compactação, para a realização do ensaio foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Balanças de 10kg e 200g, com resolução de 0,1g e 0,01g, respectivamente;
- Estufa com controle de temperatura;
- Peneira de 4,8mm;
- Cápsulas metálicas com tampa;
- Régua de aço biselada;
- Bandeja metálica;
- Espátula;
- Cilindro de Proctor pequeno (Cilindro metálico, molde e molde auxiliar);
- Soquete pequeno (massa de (2.500 ± 10) g e altura de queda de (305 ± 2) mm);
- Béquer de vidro;
- Papel filtro;

Primeiramente realizou-se a conferência de pesos e medidas de todos os equipamentos envolvidos no ensaio, seguido da montagem do conjunto do cilindro, e preparação com o papel filtro no fundo, para possibilitar a remoção sem alteração da amostra.

Como não possuímos informação sobre o teor de umidade ótimo do solo, realizou-se o procedimento indicado pela NBR 7182 (ABNT, 1984), que indica se umedecer o solo até em torno de 5% abaixo da umidade ótima previsível, através da adi-

ção de água destilada a amostra enquanto a mesma será continuamente revolvida de modo a proporcionar homogeneidade.

Após esse procedimento será iniciada a compactação da amostra no molde, que será executada com energia de compactação normal, executada em 3 camadas, com vinte e seis golpes por camada, no molde pequeno e utilizando o soquete pequeno, sendo que a antes de cada camada a anterior será escarificada, visando maior energia de ligação entre elas.

Durante a utilização do soquete deverá ser observada a altura de lançamento e a distribuição dos golpes para que a energia seja distribuída regularmente sobre a amostra.

Após concluídas as camadas, retira-se o molde auxiliar, realiza-se a regularização da superfície com a utilização da régua biselada (figura 12), então o conjunto é pesado, anotando essa massa, sendo dessa subtraída a massa do cilindro, obtém-se a massa úmida do solo compactado (Ph).



Figura 12 - Solo compactado no molde com superfície regularizada

Fonte: Autoria própria.

Então, utilizando um extrator retira-se a amostra do molde, e para a determinação do teor de umidade (h), é coletada uma amostra da parte central que é levada para a estufa, de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986).

Como o método escolhido foi com reutilização de material, a amostra do último ensaio é destorroada, passada na peneira 4,8mm, e retornada para homogeneização juntamente com o restante do material. Foram realizados ensaios aumentando 2% o teor de umidade do solo, até ser atingida a maior massa específica do conjunto, e a partir do momento em que houver a queda desta, realiza-se mais 2 ensaios, buscando a confirmação da queda desta conforme eleva-se o teor de umidade com que o solo é compactado.

Deve então ser determinada a massa específica aparente seca, que é obtida através da equação 3.

$$\gamma_s = \frac{P_h * 100}{V * (100 + h)} \quad (3)$$

Onde:

γ_s = massa específica aparente seca, em g/cm³;

P_h = Peso úmido do solo compactado, em g;

V = Volume útil do molde cilíndrico utilizado no ensaio, em cm³;

h = teor de umidade, em %;

De posse do resultado da massa específica aparente seca, iremos traçar a curva de compactação juntamente com o teor de umidade correspondente.

3.4 ENSAIOS EM CAMPO

3.4.1 Teor de umidade

Para a medição do teor de umidade foram utilizados dois métodos distintos aplicados em diferentes momentos, o primeiro deles foi o método da frigideira e o outro o método da estufa.

3.4.1.1 Método da frigideira

Segundo Milléo (2012), o método empírico da frigideira consiste basicamente em coletar uma pequena amostra do solo, colocar em uma frigideira e levar ao fogo baixo, revolvendo o material constantemente, até que cesse a evaporação, ou seja, o solo esteja seco (Figura 13).



Figura 13 - Equipamento para execução do Método da Frigideira

Fonte: Autoria própria.

E então por diferença de peso entre o material na umidade natural e após seco, é determinado o teor de umidade do solo.

3.4.1.2 Método da estufa

O método de medição do teor de umidade do solo em estufa é normatizado pelo DNIT-ME 213/94, e é realizado através da coleta de uma amostra do solo que se pretende determinar a umidade, colocando em um recipiente limpo e seco anotando o peso deste conjunto, posteriormente é levado à estufa até que não haja mais variação do peso, estando assim o solo seco.

Geralmente são necessárias 15 a 16 horas de estufa à 110 ± 5 °C para atingir a constância na massa de solo, sendo necessário retirar o conjunto da estufa e aguardar que esfrie a temperatura ambiente antes de realizar a pesagem (DNIT-ME 213/94).

O cálculo do teor de umidade é realizado conforme o item 3.3.1 .1 deste trabalho.

3.4.2 Ensaio do Frasco de Areia

Padronizado pela NBR 7185 (ABNT, 1986) Solo – Determinação da massa específica aparente, que descreve o método para obtenção da massa específica de qualquer tipo de solo que possa ser escavado com a utilização de ferramentas manuais, mas que seja suficientemente coesivo para que as paredes da cavidade aberta permaneçam estáveis durante os procedimentos de ensaio.

É necessária a seguinte aparelhagem para execução do ensaio:

- Frasco de vidro ou plástico translúcido com 3500cm³ de capacidade, com gargalo rosqueável e funil metálico com registro;
- Bandeja de 30x30cm, rígida, com bordas de 2,5cm de altura, com orifício circular no centro, dotado de rebaixo para apoio do funil;
- Nível de bolha;
- Pá de mão;
- Balanças com capacidade nominal de 1,5kg e 10kg, com precisão de 0,1g e 1g, respectivamente;
- Recipiente para armazenagem da amostra que não permita perda de umidade;
- Estufa com controle de temperatura;

- Cilindro metálico de volume conhecido, para determinação da massa específica aparente da areia;
- Areia lavada e seca, com granulometria compreendida entre 0,59 e 1,2mm;
- Peneiras 0,59 e 1,2mm;

Determina-se primeiramente a massa específica aparente seca da areia, que será utilizada para determinação do volume extraído de solo.

Para a execução do ensaio em campo, primeiramente é executada a limpeza da vegetação, e regularização da superfície em área suficiente para que a bandeja seja apoiada uniformemente, e então, cuidadosamente, utilizando a pá de mão, cava-se o solo através do orifício da bandeja com profundidade de 15 cm, armazenando cuidadosamente o solo retirado, tomando cuidado para que não haja perda de umidade.

Posteriormente é posicionado o bocal do cone fixado ao frasco de areia no orifício da bandeja, e liberado a passagem da areia pelo funil, até que se o escoamento cesse, então é fechado o registro e retirado o conjunto frasco + cone com areia remanescente, que será pesado, determinando então a quantidade de areia que foi despejada.

Para o cálculo da massa específica aparente do solo, utiliza-se a equação 4.

$$\gamma_s = \gamma_{ar} \frac{M_h * 100}{M_{10} * 100 + h} \quad (4)$$

Onde:

γ_s = Peso específico aparente do solo, em g/cm³;

γ_{ar} = Peso específico aparente da areia, em g/cm³;

M_h = Massa do solo da cavidade no terreno, em g;

h = Teor de umidade do solo extraído do terreno, em %;

M_{10} = Massa de areia que preencheu a cavidade do terreno, em g.

Para o cálculo de M_{10} na equação (4), inicialmente verifica-se a massa de areia que fica acumulada no cone, para posteriormente descontá-la do total utilizado para

o ensaio em campo, resultando assim apenas a massa de areia ocupou a cavidade no terreno.

3.4.3 Ensaio do Cone de Penetração Dinâmica

O ensaio do DCP foi realizado juntamente ao frasco de areia, tanto no aterro experimental que será executado no terreno, quanto no aterro definitivo ali instalado, isso para a determinação da correlação entre penetração do DCP e massa específica aparente obtida pelo ensaio do frasco de areia.

Posteriormente foi executado o controle da compactação do aterro propriamente dito através do ensaio DCP realizado em toda a área a obra, espaçados em 2 metros cada ensaio, e a massa específica aparente (γ_s) que indicará o grau de compactação do solo será obtida através da correlação de penetração x grau de compactação.

O ensaio do DCP necessita apenas no equipamento, respeitando padronização de dimensões conforme item 2.3.4 deste trabalho. E o método para execução do trabalho consiste em definir o ponto de avaliação e executar o ensaio, soltando o peso de 8kg da altura padrão, e anotar a penetração à cada golpe, para posteriormente comparar aos resultados ensaio do frasco de areia.

3.4.4 Pista de teste

Os ensaios em campo foram realizados em uma pista padrão na jazida de origem do solo estudado (com dimensões suficientes para desprezar os efeitos de bordas), energia de compactação constante e controle nas espessuras das camadas conforme recomendações das normativas nacionais, de não exceder 30 cm e espessura por camada.

A pista foi escavada nas dimensões de 2,60 m de comprimento, 1,00 de largura e 0,90 m de profundidade, para proporcionar área suficiente para que os ensaios necessários sejam executados, conforme figura 14.



Figura 14 – Pista escavada para testes

Fonte: Autoria própria

A vala foi compactada em 4 camadas, onde foi variado o teor de umidade do solo em cada uma, buscando obtenção de diferentes valores de massa específica, que foram levantadas com a utilização do método do Frasco de Areia com 3 amostras, juntamente foram realizados 2 ensaios com o DCP para aferição da taxa de penetração por golpe do aparelho, a alocação dos ensaios em uma das camadas segue a figura 15, lembrando que para as demais foram mantidos os números de ensaios, apenas variando o posicionamento dos mesmos na pista.



Figura 15 - Alocação dos ensaios na pista de testes

Fonte: Autoria própria

Para a medição do teor de umidade do solo utilizado em cada camada, optou-se pelo método da frigideira, pela velocidade de execução do ensaio, e tendo em vista que o resultado foi utilizado apenas para verificar a variação de umidade entre as camadas, que posterior a compactação foram coletadas amostras e determinado mais precisamente a umidade de cada através do método da estufa.

Após a determinação da massa específica e da taxa de penetração do DCP para cada camada, podemos encontrar a equação que relaciona essas 2 variáveis e então assim realizar o controle de compactação do aterro definitivo no local da obra com a utilização do Cone de Penetração Dinâmica.

3.4.5 Controle de compactação do aterro

O aterro em questão possui dimensões de 80 x 30 metros Figura 16, e teve seus últimos 0,80m de espessura, aproximadamente, realizada integralmente com o solo da classe A-1-b, por esse motivo optou-se por executar a conferência do grau de compactação ultrapassando 0,60m de profundidade.



Figura 16 – Área superficial do aterro estudado

Fonte: Autoria própria.

A alocação e espaçamento lateral entre os 50 ensaios do DCP realizados estão apresentados no Apêndice A, sendo que estes foram numerados de Sondagem 01 à Sondagem 50, onde foram tomados os valores de taxa de penetração por golpe do Cone de Penetração Dinâmica.

Posteriormente estes valores de índice de penetração do DCP foram utilizados através da correlação obtida pelo procedimento executado na pista padrão, juntamente com os valores de massa específica determinados no ensaio de Proctor Normal realizado previamente em laboratório para o mesmo solo, para aferição do grau de compactação do aterro definitivo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS

4.1.1 Resultados de Ensaios Laboratoriais

Através da aplicação da metodologia conforme descrita no item 3.4 do presente trabalho, onde foram primeiramente determinados os parâmetros de laboratório.

A tabela 2 demonstra os parâmetros do solo determinados para realizar a classificação do solo de acordo com item 3.3.1, sendo esses a determinação da granulometria do solo, assim como os limites de liquidez e plasticidade.

Tabela 2 - Determinação dos parâmetros para classificação do solo

Parâmetros	Valores obtidos
P₁₀	12,0%
P₄₀	45,9%
P₂₀₀	23,3%
IP	5,2%

Fonte: A autoria própria.

O solo em estudo foi então classificado como pertencendo à categoria A-1-b, segundo o sistema HRB (Highway Research Board), conforme item 3.3.1 deste trabalho.

Posteriormente foi realizado o ensaio de compactação, conforme descrito no item 3.3.2, através do ensaio de Proctor com energia normal. São apresentados na tabela 3, os valores de massa específica e teores de umidade obtidos na realização dos ensaios.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de Proctor

Amostras	Massa específica (g/cm ³)	Teor de Umidade (%)
1	1,55	7,95
2	1,75	10,84
3	1,86	13,26
4	1,92	14,84
5	1,94	17,06
6	1,85	19,42
7	1,69	21,44

Fonte: Autoria própria.

A partir desses resultados foi traçado o gráfico representando o comportamento da massa específica do solo compactado, conforme é alterado o teor de umidade do solo, figura 17.

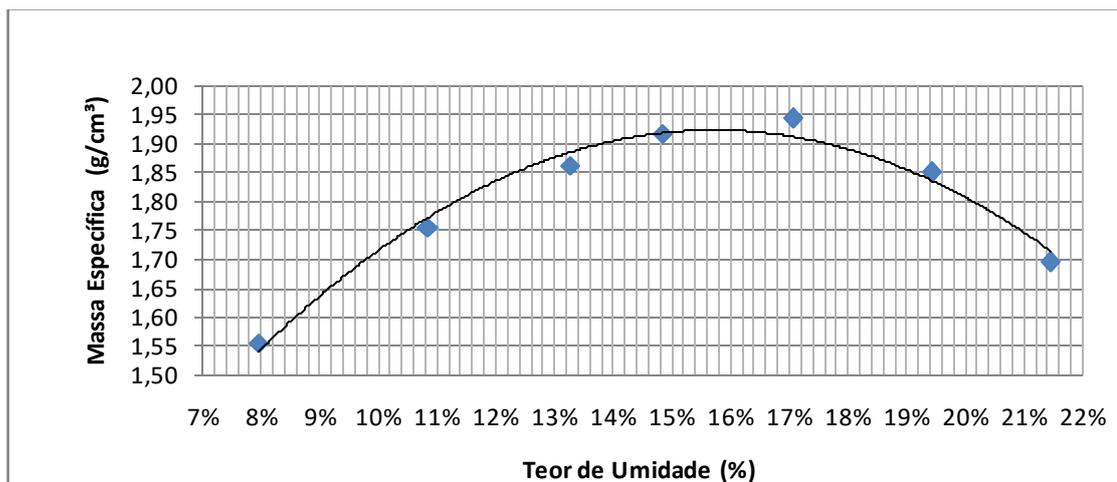


Figura 17 - Curva de compactação do ensaio de Proctor

Fonte: Autoria própria.

Temos então que a massa específica máxima para o solo estudado é de 1,94 g/cm³, atingida com teor de umidade de 17%.

Com os resultados dos ensaios laboratoriais de classificação do solo e de compactação, partimos à execução dos ensaios de campo, tendo seus procedimentos descritos no item 3.4.

4.1.2 Resultados de Ensaios em Campo

O trabalho de compactação do solo na pista de teste escavada, foi executado em 4 camadas com 25 cm de espessura, com diferentes teores de umidade, medidos em campo através do método da frigideira, que posteriormente para melhor precisão foram confirmados em laboratório através do método da estufa.

Juntamente com os resultados de teor de umidade em cada camada da vala, serão apresentados na tabela 4, os dados de massa específica seca obtidos nos ensaios do Frasco de areia para cada uma das camadas compactadas.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de compactação da vala

Ensaio	Massa específica (g/cm ³)	Teor de Umidade (%)
1.a	1,74	10,74
1.b	1,80	11,27
1.c	1,78	11,03
2.a	2,08	15,36
2.b	2,06	14,07
2.c	2,01	14,27
3.a	2,24	17,10
3.b	2,25	16,84
3.c	2,32	17,88
4.a	1,98	21,82
4.b	2,15	23,14
4.c	2,02	22,21

Fonte: Autoria própria.

Sendo que a coluna “Ensaio” na tabela 3 segue a formatação em que o número representa a camada e a letra o ensaio realizado nesta, por exemplo, o ensaio 1.a, “1” representa a primeira camada e “a” o primeiro ensaio realizado nesta.

Tendo em vista a baixa dispersão dos dados levantados, adotamos o valor da massa específica na camada, como sendo a média entre os resultados obtidos nos 3 ensaios realizados na camada, o mesmo procedimento foi adotado para o teor de umidade, e os resultados estão demonstrados na tabela 5.

Tabela 5 - Resultados médios do ensaio de compactação da vala

Camada	Massa específica (g/cm ³)	Teor de Umidade (%)
1	1,77	11,01
2	2,05	14,56
3	2,27	17,27
4	2,10	22,39

Fonte: Autoria própria.

Foram executados também em cada uma das camadas 2 testes de penetração do DCP, conforme item 3.4.3 deste trabalho. Foram obtidos então os valores de índice de Penetração do equipamento DCP no solo, demonstrados na tabela 6, assim como os valores médios de massa específica seca obtidas para a camada.

Tabela 6 – Índice de Penetração do DCP por golpe

Sondagem	Penetração (mm)	Massa Específica (g/cm ³)
1.d	76	1,77
	70	1,77
	73	1,77
1.e	72	1,77
	75	1,77
	73	1,77
2.d	53	2,01
	55	2,01
	51	2,01
2.e	50	2,01
	53	2,01
	55	2,01
3.d	29	2,27
	26	2,27
	27	2,27
	30	2,27
3.e	31	2,27
	30	2,27
	28	2,27
	28	2,27
4.d	47	2,05
	45	2,05
	45	2,05
	44	2,05
4.e	47	2,05
	48	2,05

Fonte: Autoria própria.

Onde na coluna “Sondagem”, o numeral representa a camada de compactação, e as letras “d” e “e” o primeiro e segundo ensaio de sondagem da camada respectivamente.

Então obtidos os valores de penetração do DCP e massa específica para cada uma das camadas compactadas, podemos traçar um gráfico relacionando essas 2 variáveis, conforme figura 18.

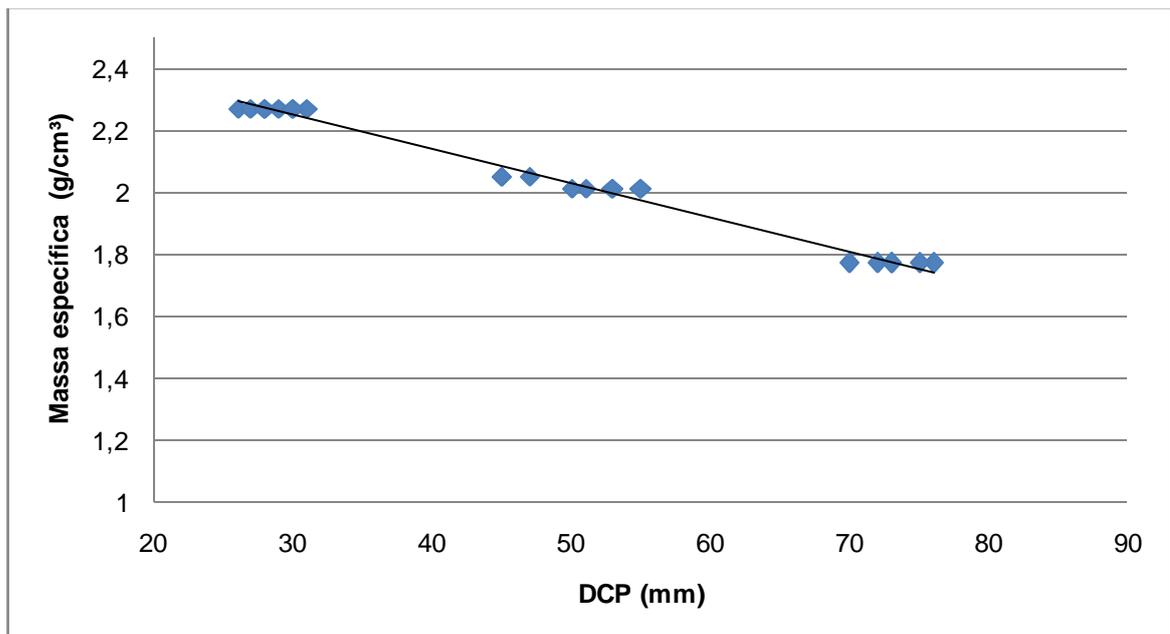


Figura 18 - Relação entre DCP e Massa específica seca

Fonte: Autoria própria.

A partir destes dados foi possível encontrar a equação linear que representa a relação entre massa específica seca do solo e a penetração do DCP. Sendo a equação (5) a que melhor se ajusta ao comportamento levantado, apresentando um valor de $R^2 = 0,986$, demonstrando uma ótima correlação entre as variáveis envolvidas.

$$y = -0,011x + 2,581 \quad (5)$$

Tendo obtido essa equação, que torna possível relacionar profundidades de penetração por golpe no ensaio do DCP em milímetros (variável x), com a massa específica em que o solo se encontra em g/cm^3 (variável y), viabilizamos a conferência do grau de compactação do aterro, conforme descrito no item 3.4.5.

De modo a não sobrecarregar o trabalho com inúmeras tabelas, iremos exemplificar o procedimento adotado utilizando uma amostra de 2 ensaios de sondagens, dos 50 realizados para o controle de compactação do aterro, demonstrando todo o tratamento aplicado após a obtenção dos dados em campo.

Os dados de penetração do DCP para as 2 sondagens, são apresentados na tabela 7.

Tabela 7- Dados de Penetração do ensaio DCP

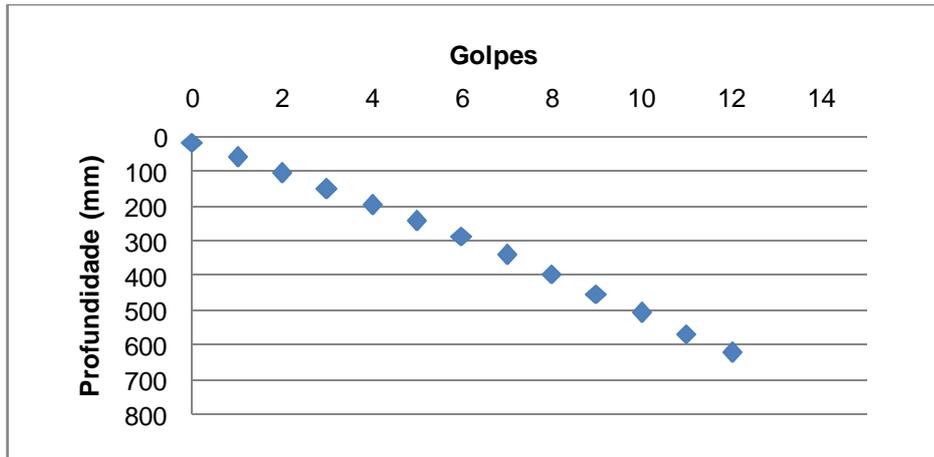
Nº de golpes	Sondagem 1 Penetração (mm)	Sondagem 2 Penetração (mm)
0	15	31
1	60	74
2	105	118
3	151	162
4	198	205
5	243	249
6	288	294
7	342	344
8	396	393
9	452	443
10	509	493
11	567	544
12	623	592
13	--	643

Fonte: Autoria própria.

Foi nomeado como “golpe 0”, o procedimento de queda do martelo do equipamento DCP de 10 cm de altura, visando apenas uma leve penetração ultrapassando a camada de materiais instáveis depositados na superfície e proporcionar o nivelamento da base do aparelho.

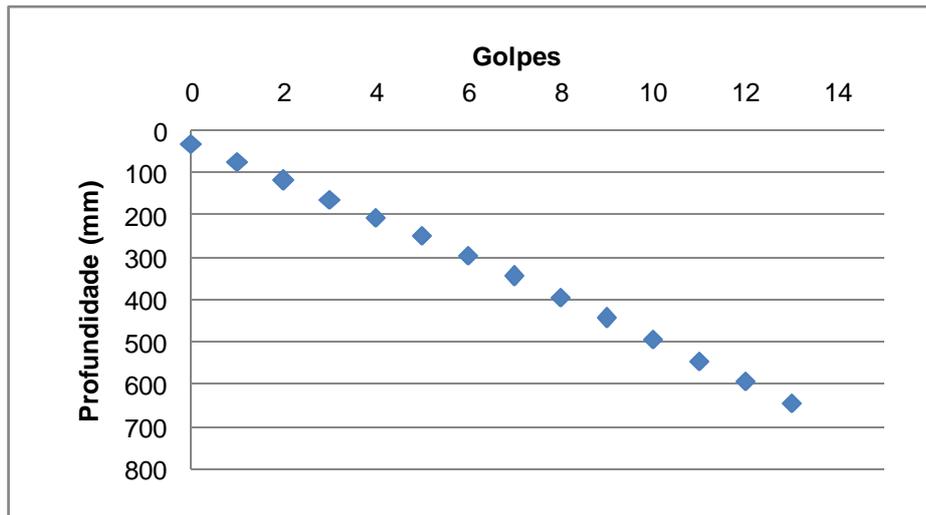
A partir desta tabela foi traçado a curva correspondente ao ensaio do DCP, figuras 19 e 20, que representa quantos golpes foram necessários para atingir uma determinada profundidade no solo.

Figura 19 - Ensaio DCP para a sondagem 1



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 - Ensaio DCP para a sondagem 2



Fonte: Autoria própria.

Sendo a inclinação da reta, ou dos segmentos de reta formados pela conexão dos pontos do gráfico acima (figura 19 e 20) o índice de penetração por golpe do DCP em cada profundidade (DN)

Foi calculada então a taxa de penetração por golpe do DCP (DN), através da equação 6.

$$DN \text{ (mm/golpe)} = DCP_{(n)} - DCP_{(n-1)} \quad (6)$$

Que está demonstrada na tabela 8.

Tabela 8 - Taxa de penetração por golpe do DCP (DN)

Nº de golpes	Sondagem 1 Penetração (mm)	Sondagem 2 Penetração (mm)
0	---	---
1	45	43
2	45	44
3	46	44
4	47	43
5	45	44
6	45	45
7	54	50
8	54	49
9	56	50
10	57	50
11	58	51
12	56	48
13	--	51

Fonte: Autoria própria.

Traçamos então o gráfico que representa o comportamento do valor de DN com o avanço da profundidade de penetração, denominado de diagrama estrutural do DCP representado na figura 21 e 22.

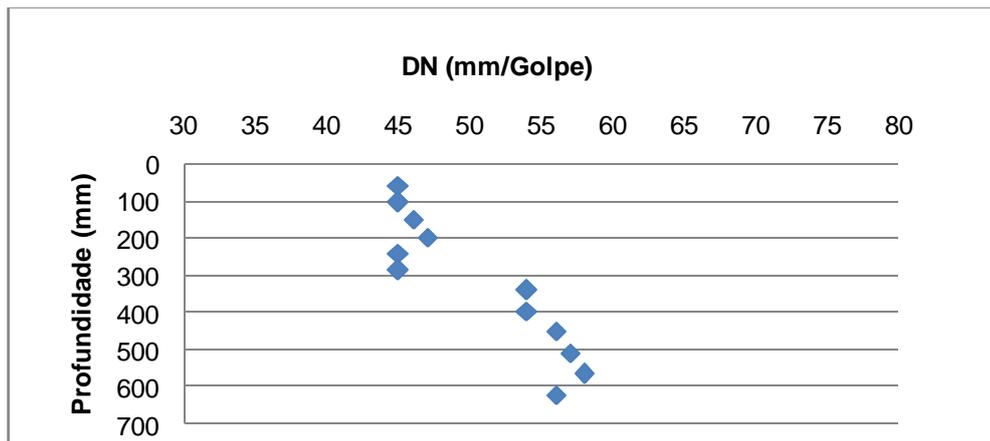


Figura 21 - Diagrama Estrutural do DCP – Sondagem 1

Fonte: Autoria própria.

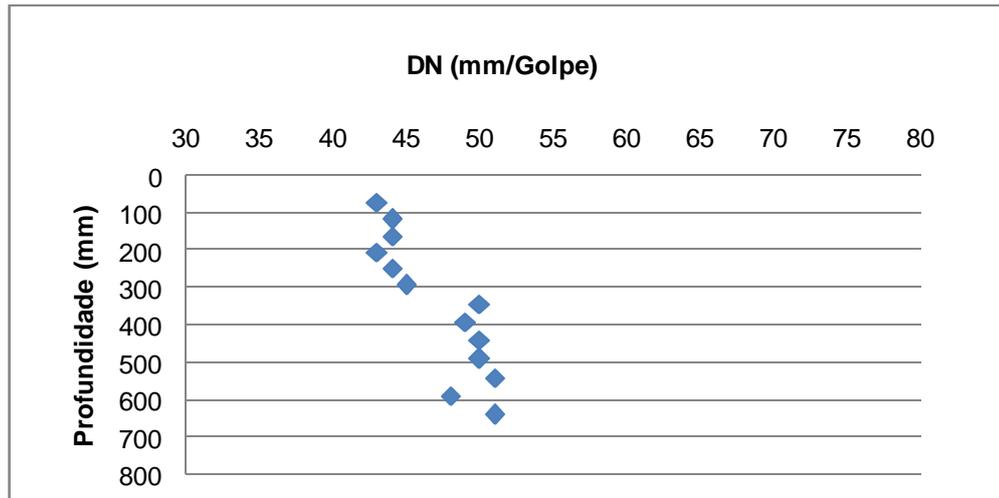


Figura 22 - Diagrama Estrutural do DCP - Sondagem 2

Fonte: Autoria própria.

É possível constatar através da observação das figuras 21 e 22, assim como através dos diagramas estruturais das demais sondagens executadas, que a resistência a penetração do solo varia substancialmente a aproximadamente 0,30 m de profundidade, o que pode indicar uma possível alteração da camada de compactação nesta cota.

Então de posse dos valores de DN, foi possível a determinação da massa específica em que o solo se encontrava a cada profundidade ensaiada, com a utilização da equação (5), estando os valores demonstrados na tabela 9.

Tabela 9 - Massa específica do solo a cada golpe do DCP

Nº de golpes	Sondagem 1	Sondagem 2
	Massa Específica (ρ) (g/cm ³)	Massa Específica (ρ) (g/cm ³)
0	---	---
1	2,09	2,11
2	2,09	2,10
3	2,08	2,10
4	2,06	2,11
5	2,09	2,10
6	2,09	2,09
7	1,99	2,03
8	1,99	2,04
9	1,97	2,03
10	1,95	2,03
11	1,94	2,02
12	1,97	2,05
13		2,02

Fonte: Autoria própria

Foi possível então traçarmos um gráfico representando a variação da massa específica (ρ) à medida que o ensaio atingia maiores profundidades, conforme figuras 23 e 24.

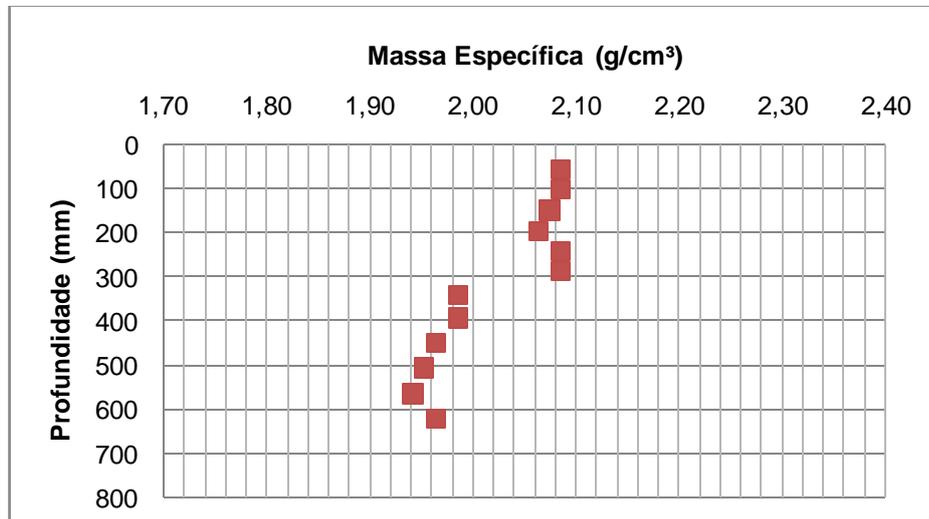


Figura 23 - Variação da massa específica ao longo da profundidade – Sondagem 1

Fonte: Autoria própria.

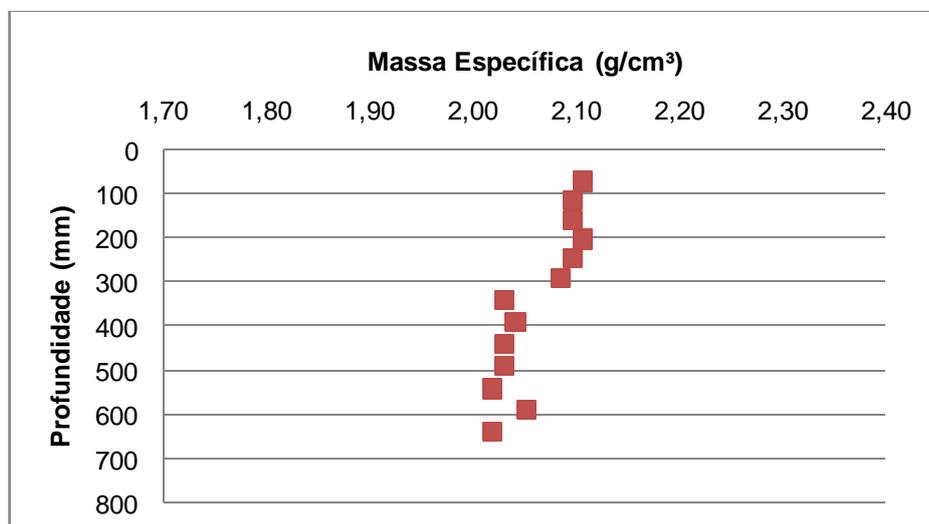


Figura 24 - Variação da massa específica ao longo da profundidade – Sondagem 2

Fonte: Autoria própria.

Através de compactação entre os diagramas estruturais (figuras 21 e 22) e os gráficos de variação da massa específica ao longo da profundidade ensaiada (figuras 23 e 24), pode-se observar que a massa específica aparente seca é inversamen-

te proporcional à taxa de penetração do ensaio do DCP, ou seja, quanto maior o ρ , maior é a resistência à cravação do cone.

Com a utilização da curva de compactação do solo encontrada através do ensaio de Proctor, mostrado em 4.1.1, foi possível calcular o grau de compactação para cada intervalo penetrado pelo ensaio do DCP, através da equação (7).

$$GC = \frac{\rho}{\rho_{\text{máx}}} \quad (7)$$

Onde:

GC = Grau de compactação.

ρ = Massa específica (g/cm^3).

$\rho_{\text{máx}}$ = Massa específica máxima pelo ensaio de Proctor (g/cm^3).

Os valores de grau de compactação para as sondagens modelo estão demonstrados na tabela 10.

Tabela 10 - Grau de compactação determinado em cada golpe do DCP

Nº de golpes	Grau de Compactação Sondagem 1	Grau de Compactação Sondagem 2
0	---	---
1	108%	109%
2	108%	108%
3	107%	108%
4	106%	109%
5	108%	108%
6	108%	108%
7	102%	105%
8	102%	105%
9	101%	105%
10	101%	105%
11	100%	104%
12	101%	106%
13		104%

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado tanto na tabela 10, quanto na tabela 9, assim como nas figuras 23 e 24, podem ser observadas possíveis 2 camadas de compactação para o aterro até a profundidade analisada.

Como por exemplo, para a “Sondagem 1”, a massa específica aparente seca permanece estabilizada em 2,07 a 2,08 g/cm³ (Tabela 9), resultando em um grau de compactação de aproximadamente 108% (Tabela 10) durante os primeiros 6 golpes do ensaio, ou seja, até uma profundidade de 28,8 cm (Tabela 7). A partir deste ponto houve um salto abrupto nos valores de massa específica aparente seca conforme foi dado continuidade ao ensaio, passando para 1,97 a 1,99 g/cm³, que resulta em um GC de 101% a 102% que se mantém até a totalidade da profundidade de penetração do DCP, ou seja, uma redução na ordem de 7% a 8% no grau de compactação.

Então conforme citado no item 2.3.4.1.1 deste trabalho, o equipamento de DCP é uma ótima ferramenta para identificação das espessuras de camadas de compactação, pois é sensível a variações de ρ , fato que se evidencia através dos gráficos de Diagrama estrutural do DCP (Figuras 21 e 22) e da Variação da massa específica ao longo da profundidade (Figuras 23 e 24).

Esse comportamento de diferenças no grau de compactação foi encontrado de forma evidente em 49 das 50 sondagens com o DCP realizados no aterro, tornando possível então identificar que a camada superficial possui espessura de 30 ± 5 cm, e a camada seguinte se estende até a profundidade máxima ensaiada, não sendo possível assim determinar sua espessura.

Para a sondagem em que não se detectou este comportamento dicotômico, pode ser pelo fato de a compactação de ambas as camadas terem atingido valores de GC próximos, dificultando esse reconhecimento.

Determinou-se como sendo a massa específica da camada, a média dos valores de ρ encontrados para essa camada, cujos valores encontrados para as 50 sondagens estão apresentadas nas tabelas 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 17.

Tabela 11 - Grau de compactação médio das camadas - Sondagem 1 à 8

Camada	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8
1	1,07	1,08	1,10	1,11	1,09	1,07	1,07	1,04
2	1,01	1,05	1,05	1,03	1,00	1,00	1,03	0,97

Fonte: Autoria própria

Tabela 12 - Grau de compactação médio das camadas - Sondagem 9 à 15

Camada	Teste 9	Teste 10	Teste 11	Teste 12	Teste 13	Teste 14	Teste 15
1	1,08	0,98	1,03	1,09	1,07	1,03	0,97
2	1,02	0,91	0,97	1,04	1,04	0,98	0,92

Fonte: Autoria própria

Tabela 13 - Grau de compactação médio das camadas - Sondagem 16 à 22

Camada	Teste 16	Teste 17	Teste 18	Teste 19	Teste 20	Teste 21	Teste 22
1	1,10	1,10	1,10	1,06	1,00	1,06	1,09
2	1,03	1,05	1,00	0,99	0,92	1,04	1,04

Fonte: Autoria própria

Tabela 14 - Grau de compactação médio das camadas - Sondagem 23 à 29

Camada	Teste 23	Teste 24	Teste 25	Teste 26	Teste 27	Teste 28	Teste 29
1	1,09	1,09	1,04	1,08	1,08	1,10	1,09
2	1,01	1,04	0,99	1,04	1,05	1,05	1,04

Fonte: Autoria própria

Tabela 15 - Grau de compactação médio das camadas - Sondagem 30 à 36

Camada	Teste 30	Teste 31	Teste 32	Teste 33	Teste 34	Teste 35	Teste 36
1	1,06	1,07	1,08	1,09	1,05	1,04	1,09
2	1,02	1,03	1,04	1,04	1,03	1,04	1,03

Fonte: Autoria própria

Tabela 16 - Grau de compactação médio das camadas - Sondagem 37 à 43

Camada	Teste 37	Teste 38	Teste 39	Teste 40	Teste 41	Teste 42	Teste 43
1	1,09	1,09	1,05	1,06	1,10	1,08	1,07
2	1,04	1,03	1,01	1,02	1,05	1,04	1,03

Fonte: Autoria própria

Tabela 17 - Grau de compactação médio das camadas - Sondagem 44 à 50

Camada	Teste 44	Teste 45	Teste 46	Teste 47	Teste 48	Teste 49	Teste 50
1	1,07	1,05	1,09	1,09	1,08	1,06	1,04
2	1,02	1,03	1,04	1,04	1,04	1,02	0,99

Fonte: Autoria própria

Constatou-se então que nas sondagens 08, 11 e 14 os valores obtidos para o GC não atingiram 100% como exigido para as ultimas 2 camadas de compactação, conforme descrito no item , porém os valores encontrados foram de 97, 97 e 98% na

segunda camada, respectivamente. No entanto na camada superior foi atingido o mínimo requerido.

Porém quando realizamos as análises das sondagens 10, 15 e 20, percebe-se uma notável variação do valor de GC encontrado com relação aos mínimos determinados, que atingiram para a segunda camada 91%, 92% e 92%, respectivamente. Sendo que o grau de compactação da camada superior também não se mostrou satisfatório, alcançado valores de 98% para a sondagem 10 e 97% para a sondagem 15.

Então temos que para as 50 sondagens efetuadas, em 6 destas a qualidade quanto ao grau de compactação alcançado em campo, comparado aos resultados de massa específica seca obtida nos testes laboratoriais, não satisfaz aos parâmetros mínimos de GC impostos pela NBR 5681/15 e DNIT 108/2009, conforme item 2.2.4.

Os dados de compactação média para cada uma das camadas identificadas foi lançado nos locais onde cada ensaio do DCP foi executado, tornando possível assim visualizar o GC de cada camada individualmente e a identificação de regiões onde possivelmente o grau de compactação não atingiu os valores mínimos necessários, descritos no item 2.2 deste trabalho (Apêndices B e C).

Podemos identificar então que as sondagens 10, 14, 15 e 20, que foram os que apresentaram menor grau de compactação, estão localizados próximos uns aos outros e em uma região de periferia da área do aterro, gerando então uma zona de má compactação, que poderá comprometer as estruturas construídas sobre essa região.

Estes valores de massa específica aparente seca do solo na região que não atingiu 100% do grau de compactação nas camadas ensaiadas pode ser devido à proximidade com as bordas do aterro, por não ter sido compactada na umidade correta, ou até mesmo um menor número de passagens do rolo, resultando em uma menor energia aplicada sobre o maciço terroso.

Pode ser notado que para as demais regiões do aterro a compactação foi eficiente, superando ou igualando o valor mínimo de 100% do grau de compactação determinado em norma para as camadas superficiais.

Foi observado que com a aplicação do método do Cone de Penetração Dinâmica, foi possível pela sua maior agilidade de ensaio comparado ao método do Frasco de Areia, a realização de um número significativamente maior de amostras, a

partir das sondagens na obra do aterro, fator que gera um melhor mapeamento da qualidade de compactação, além de uma delimitação mais precisa das áreas que necessitam de correções por não atingirem o GC mínimo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi buscar uma correlação entre o ensaio do Cone de Penetração Dinâmica e o método usual de medição da massa específica aparente seca do solo na realização de obras de aterro, o ensaio do Frasco de Areia. E a partir desta, demonstrar a aplicação do ensaio do DCP no controle do grau de compactação de aterros.

Pode ser observado através do estudo realizado que para o solo da Classe A-1-b, seguindo a classificação proposta pelo sistema HRB (Highway Research Board), que a relação entre a penetração obtida através do ensaio DCP e os resultados de massa específica aparente seca, levantados através do ensaio do Frasco de Areia, apresentou um nível elevado de correlação, tornando possível assim a análise do GC do aterro baseado nos resultados do ensaio do DCP.

O equipamento de DCP também se mostrou uma ótima ferramenta para identificação das espessuras de camadas de compactação, pois é sensível a variações de ρ , fato que se evidencia através dos gráficos de Diagrama estrutural do DCP (Figuras 21 e 22) e da Variação da massa específica ao longo da profundidade (Figuras 23 e 24).

Além de proporcionar a capacidade de avaliação das camadas inferiores do aterro, a até uma profundidade de 80 cm, viabilizando a verificação do grau de compactação das camadas inferiores de aterros já concluídos.

Assim como através dos dados obtidos pelo índice de penetração do DCP a cada golpe, pode-se ter um indicativo sobre a homogeneidade da compactação das camadas, podendo ser identificadas falhas na compactação sejam por impurezas no solo utilizado, camadas muito espessas ou outros fatores que podem alterar a qualidade da compactação do solo.

Então o ensaio do Cone de Penetração Dinâmica pode ser aplicado a classe de solo estudado neste trabalho, para a realização do controle de compactação de aterros, tanto na avaliação do grau de compactação, onde a sua utilização proporciona maior velocidade na execução dos ensaios e obtenção dos resultados, pois o DCP demonstrou ser um método mais ágil comparado ao método do Frasco de Areia, permitindo que fossem tomados um número maior de amostras, melhorando o mapeamento da qualidade da compactação da obra.

Como sugestão para trabalhos futuros podem ser determinadas as correlações entre os ensaios de medida da massa específica aparente seca, no caso deste trabalho o método utilizado foi o do Frasco de Areia, com a penetração do DCP para outros tipos de solo, pois o equipamento se mostrou versátil e de grande capacidade de análise do grau de compactação do aterro, assim como estimativa da espessura das camadas de compactação, presença de falhas na compactação, assim como gerar através de uma amostragem mais expressiva em relação ao método do Frasco de Areia um mapeamento da qualidade da compactação na obra, buscando reforçar e difundir a utilização do método nos controles de compactação das obras de solos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização Física e Classificação dos solos**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Departamento de Transportes. 2005.

ALVES, A. B. C. **Avaliação da capacidade de suporte e controle tecnológico de execução da camada final de terraplenagem utilizando o penetrômetro dinâmico de cone**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

AMARAL, F. C. de F. **Previsão da Capacidade de Suporte de Areias Médias e Finas Uniformes em Obras Viárias com o Emprego do Ensaio DCP**. 2005.
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5681**: Controle tecnológico da execução de aterros em obras de edificações. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7185**: Solo – Determinação da massa específica aparente, “in situ”, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 1986.

BAPTISTA, C de F. N. **Pavimentação**. Editora Globo, 1976.

BERTI, C. **Avaliação da capacidade de suporte de solos “in situ” em obras viárias através do Cone de Penetração Dinâmica** - Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes - DNIT. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação** - 3. ed. Rio de Janeiro: 2006

CANTARELLI, P; DEFAVERI, K. **Controle da Compactação do Subleito de Valas de travessias de Vias Urbanas através do Emprego do Cone de Penetração Dinâmica**. 2015.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CRISPIM F. A. **Compactação De Solos: Influência De Métodos E De Parâmetros De Compactação Na Estrutura Dos Solos**. Viçosa, Minas Gerais – BRASIL. 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM – DNER. **DNER–MT 213/94**. Solos – Determinação do teor de umidade. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA ESTRUTURA TERRESTRE – DNIT. **DNIT 108/2009**. Terraplanagem – Aterro – Especificação de Serviço. 2009.

Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**, 3. ed. – Rio de Janeiro, 2006.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

Lopes S. P. G. **Validação do compactador de Harvard no estudo da compactação de solos**. Instituto Superior de engenharia de Coimbra. 2014.

MARCELLI, M. **Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras**. São Paulo: PINI, 2007,.

MILLÉO, I. A. F. **Análise de especificações de aterro e correlação entre CBR e capacidade de carga em solos compactados**. Curitiba, 2012.

OLIVEIRA, L. E. e VERTAMATI, E., **Análise de Pavimentos com Baixo Volume de Tráfego Executado com Solos Transicionais**, SINBATRA – I Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego, vol. 1, Rio de Janeiro, 1997.

PINTO, C.de S. **Curso Básico de Mecânica de Solos em 16 Aulas**. 2ª Edição com exercícios resolvidos. São Paulo: Oficina de Textos. 2002.

RICARDO, H. de S. e CATALANI, G. **Manual prático de escavação**. Editora PINI 1990.

Rico, A. & Del Castillo, H. **La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres**. Editora Limusa, México. 1976.

Santos J. A. **Compatação, Elementos Teóricos**. Instituto Superior técnico de Engenharia Civil e Arquitetura. Fev. de 2008.

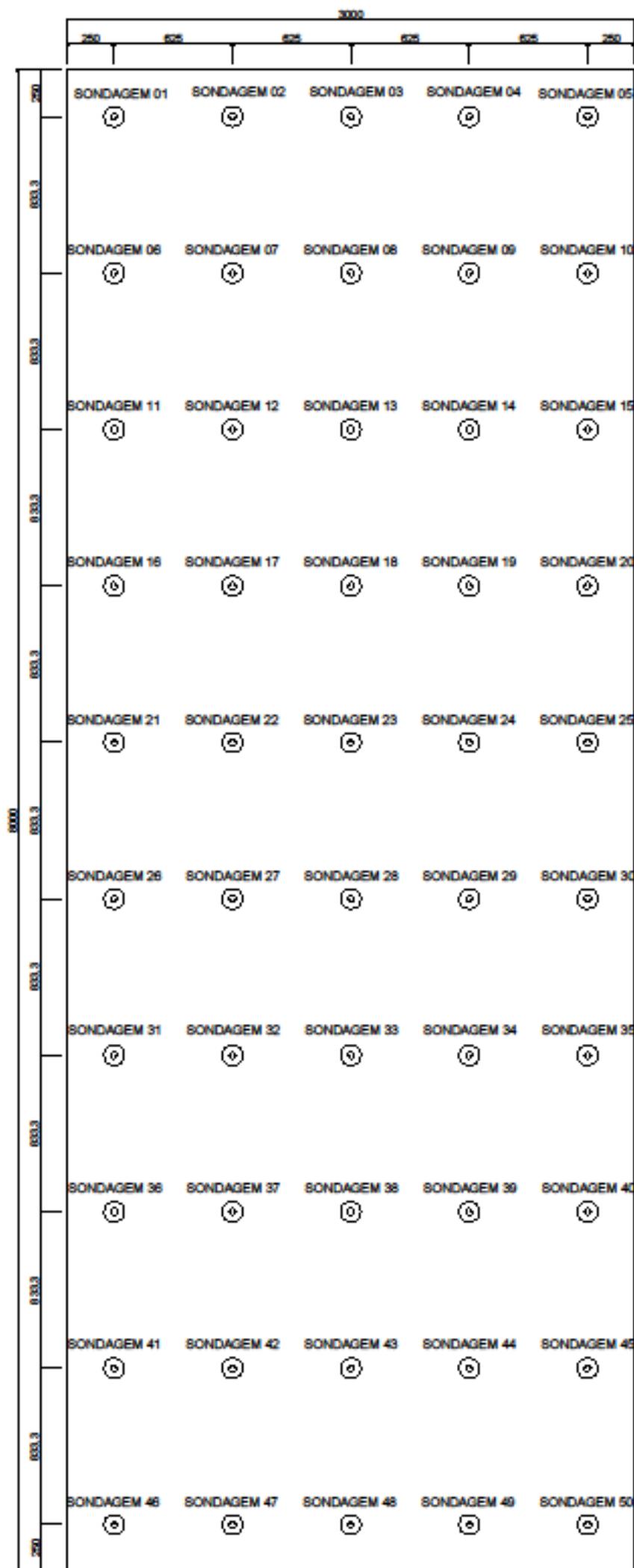
SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**, vol. I - 1 a. ed. - São Paulo: Pini, 1997.

SOUSA P. C. **Curso básico de mecânica dos solos. 3 ed.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SOUZA, M. L. **Método de projeto de pavimentos flexíveis.** 3 ed. Rio de Janeiro. 1981.

TRANSPORT AND ROAD RESEARCH LABORATORY. **Operating Instructions for the TRRL Dynamic Cone Penetrometer.** Overseas Unit. Crowthorne. 1986.

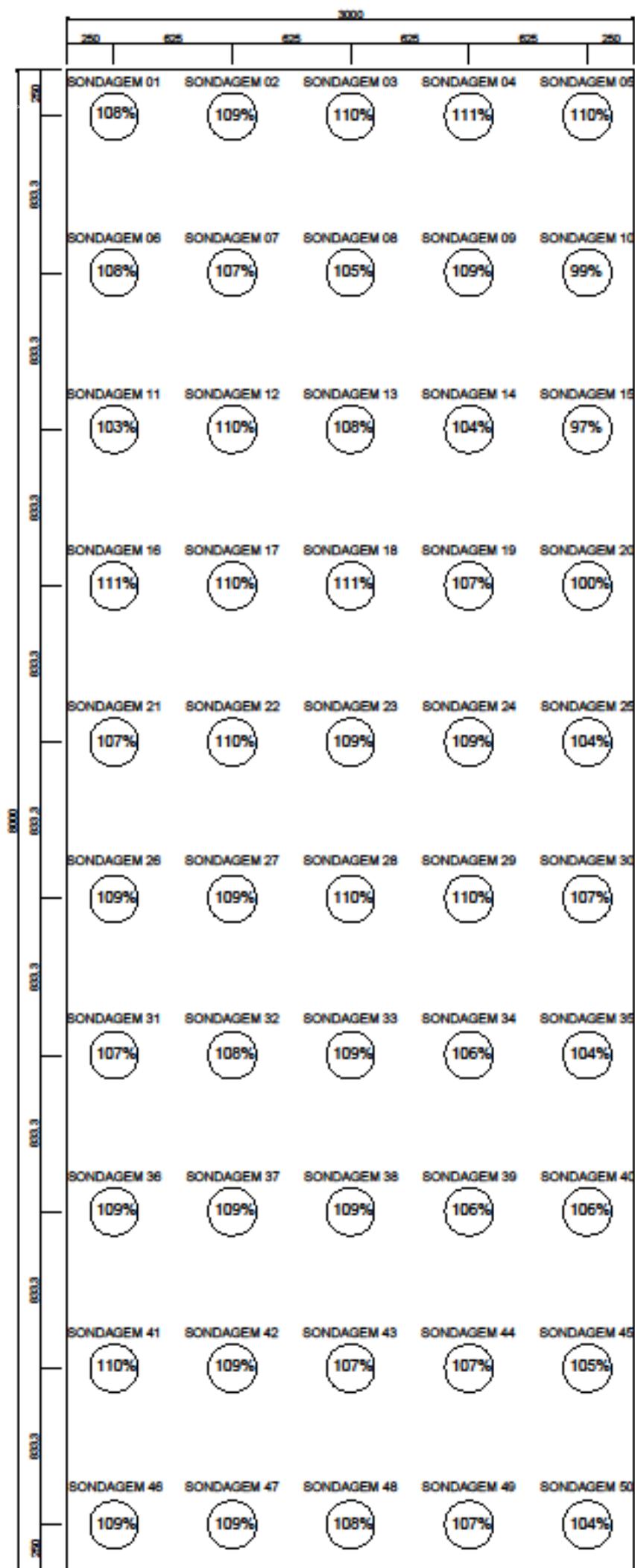
Apêndice A - Posicionamento das Sondagens no Aterro



ESCALA 1:30



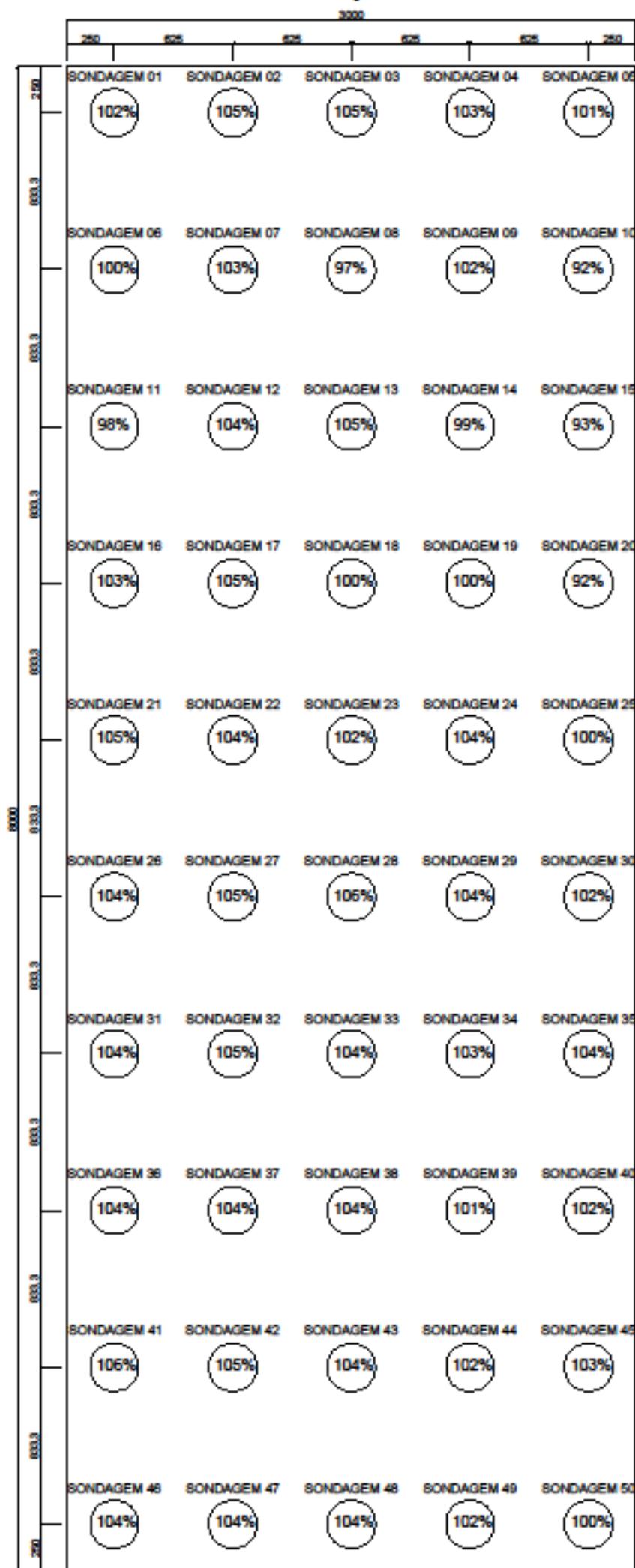
Apêndice B - Grau de Compactação Médio da Primeira Camada



ESCALA 1:30



Apêndice C - Grau de Compactação Médio da Segunda Camada



ESCALA 1:30

