

RAMON FERNANDES

**DESENVOLVIMENTO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS DCP E CBR
ESTUDO DE CASO: PISTA DE TESTES, UFSC-JOINVILLE**

Joinville, 2015

RAMON FERNANDES

**DESENVOLVIMENTO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS DCP E CBR
ESTUDO DE CASO: PISTA DE TESTES, UFSC-JOINVILLE**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Infraestrutura.

Orientador: Marcelo Heidemann

Joinville, 2015

FERNANDES, Ramon; FERNANDES, R

Desenvolvimento de correlação entre os ensaios DCP e CBR. Estudo de Caso: Pista de Testes, UFSC-Joinville.

Joinville, 2015, volume único, 80p

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura),

Curso de Graduação em Engenharia de Infraestrutura,

Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM) - Campus Joinville

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Heidemann

Defesa: 02/12/2015

Palavras chave: DCP. CBR. Solos Compactados.

**DESENVOLVIMENTO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS DCP E CBR
ESTUDO DE CASO: PISTA DE TESTES, UFSC-JOINVILLE**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de graduado em Engenharia de Infraestrutura, e aprovado em sua forma final pela banca examinadora perante o curso de Engenharia de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville.

Prof^a.Valéria Bennack.
UFSC – Campus Joinville
Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM)
Coordenadora do Curso Engenharia de Infraestrutura

Joinville, 02 de Dezembro de 2015.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcelo Heidemann
Orientador
UFSC – Campus Joinville
Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM)

Prof. Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez
UFSC – Campus Joinville
Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM)

Eng.^o Jomaley Moba Lins
Paviplan Pavimentação LTDA.

Dedico este trabalho:

Primeiramente a Deus;

Aos meus pais José Anísio e Sônia Margarida e;

Aos meus irmãos Willian e Sabrina.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Anísio Fernandes e Sônia Margarida Corrêa Fernandes, pelo apoio integral em todas as minhas decisões, nunca deixando faltar nada em todas as fases da minha vida. Sem eles nada seria possível.

Aos meus irmãos, Willian e Sabrina Fernandes, pelo companheirismo, incentivo e amizade em toda a minha vida.

Ao meu amor, Priscila Silva, pela compreensão em todos os momentos difíceis, além do carinho e dedicação dispensada.

A todos da minha família que, de alguma forma, ajudaram a alcançar meus objetivos.

Ao meu orientador, Marcelo Heidemann, pela orientação, esforço, dedicação, incentivo e confiança, e também pela amizade criada ao longo do período de engenharia.

Ao meu colega e amigo Rodrigo Machado, pela ajuda sempre disponível nos ensaios de laboratório quando necessário.

Ao Laboratorista Luiz Fernando Hartmann, por dispor de seu tempo e laboratório para execução dos ensaios deste trabalho, além da ajuda, esforço e disposição para com os mesmos.

A toda “Família Sedentários f(c)”, pelo companheirismo, incentivo e amizade, não só no período de engenharia, mas também para toda a vida.

Ao meu grande amigo Lucas Coelho dos Santos, considerado um “irmão”, por nunca hesitar uma ajuda a mim, além de todo o incentivo ao estudo no período de engenharia.

A todos que foram meus colegas de apartamento, em especial aos meus amigos Vinicius Martins Freire e Fernando John Roesner, pelo companheirismo e por todos os momentos difíceis passados ao longo do período de engenharia.

A todos os meus amigos, tantos os novos quanto aos de longa data.

A todos os envolvidos, meu muito obrigado.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein.

RESUMO

Este trabalho objetivou o desenvolvimento de correlações entre os ensaios “*California Bearing Ratio*” (CBR) e “*Dynamic Cone Penetrometer*” (DCP), os quais são usados para avaliar a capacidade de suporte do solo, principalmente para fins de pavimentação. O material para o qual foram estabelecidas as correlações é o existente como reforço de subleito na da pista de testes do campus de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Diversas correlações já foram previamente estabelecidas, como exemplos as de Heyn (1986), Herison (1986 e 1987), Vertamatti e Oliveira (1997) e Trichês e Cardoso (1998). O emprego destas correlações é pertinente devido ao ensaio DCP ser utilizado por vários órgãos do mundo, possuindo uma norma técnica internacional desde 2003. Suas vantagens perante o CBR são a velocidade de execução do ensaio, a aplicabilidade *in situ* sendo um ensaio praticamente não-destrutivo, a simplicidade e baixo custo do equipamento. Para estabelecimento da correlação foram efetuados ensaios de CBR em corpos de prova compactados em diferentes umidades e sob energias normal e intermediária. Nestes mesmos corpos de prova foram realizados ensaios DCP, estabelecendo-se um modelo matemático para correlacionar os valores de CBR aos de DN (medidos no DCP). Similar procedimento foi realizado em uma amostra coletada de forma indeformada. A validação da correlação se deu pela comparação do CBR obtido pelo ensaio na amostra indeformada e os resultados da correlação utilizando o DN obtido na amostra indeformada e no local de coleta da mesma na pista de testes. Efetuou-se 13 ensaios de DCP na extensão do trecho estudado e foi avaliada a qualidade de compactação do reforço. Com isso, fez-se, através da correlação encontrada, um perfil de CBR da pista de testes em função de sua extensão e profundidade. Pôde-se perceber, que o reforço de subleito existente apresenta significativa heterogeneidade em termos de CBR, de forma geral com valores inferiores à 5. Concluiu-se também que há uma evidente relação, mesmo que empírica, entre o ensaio CBR e DCP, e por isso, o último se torna uma boa técnica para o auxílio do ensaio CBR para avaliação do estado de compactação dos solos.

Palavra-chave: DCP, CBR, Solos compactados.

ABSTRACT

The aim of this study is to develop correlations between "California Bearing Ratio" (CBR) and "Dynamic Cone Penetrometer" (DCP) tests, which are used to evaluate the soil bearing capacity, particularly for paving purposes. The material analyzed in this study is the soil layer that acts as a reinforcing of subgrade of the test track of Federal University of Santa Catarina (UFSC) - Joinville. Several correlations have been previously established, as examples Heyn (1986), Herison (1986 and 1987), Oliveira Vertamatti (1997) and Triches and Cardoso (1998). The use of those correlations is relevant due to the fact that DCP tests are used in many countries along the world, regulated through an international technical standard since 2003. Its advantages to the CBR are the speed of execution, the applicability in situ as an almost non-destructive test, its simplicity and low cost of equipment. In order to establish the correlation, CBR tests were run in specimens compacted at different moisture contents and under normal and intermediate energies. The same specimens were also subjected to DCP tests, setting up a mathematical model to correlate the CBR values to DN (measured in DCP). A similar procedure was performed in an undisturbed sample. The validation of the established correlation was made comparing the CBR obtained by testing the undisturbed sample and the correlation results using the DN obtained in this same undisturbed sample at the same collected local in the test track. Thirteen DCP tests were made along a section in the test track for evaluation of quality of compaction of the subgrade reinforcement layer. Applying those results on the proposed correlation a profile of CBR variability of the test track was developed as a function of its length and depth. Verifying a significant heterogeneity in terms of bearing capacity in the existing subgrade reinforcement, with typically values lower than five. It was also concluded that there is a clear link, although empirical, between CBR and DCP test, and therefore, the latter becomes a good technique to help the CBR test for evaluating the state of soil compaction.

Key-words: DCP, CBR, Compacted soils.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

AASHO *Association of State Highway Officials*

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM *American Society for Testing and Materials*

CBR *Califórnia Bearing Ratio*

DCP *Dynamic Cone Penetrometer*

DN índice de penetração

DNER Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

HRB *Highway Research Board*

IG Índice de Grupo

IP Índice de Plasticidade

ISC Índice de Suporte Califórnia

LL Limite de Liquidez

LP Limite de Plasticidade

PERG Peso Específico Real do Grãos

R² Coeficiente de Determinação

SUCS Sistema Unificado de Classificação dos Solos

TRD *Transvaal Roadment*

UFRGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

USACE *United States Corps of Engineers*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Execução do ensaio DCP em campo	21
Figura 2 - Equipamento do ensaio DCP	23
Figura 3 – (a) Equipamento DCP-UFSC-Joinville; (b) peças componentes do DCP.....	23
Figura 4 - Correlações apresentadas graficamente.....	26
Figura 5 - Fluxograma da metodologia.	28
Figura 6 - Pontos de execuções e coleta na pista de testes.....	29
Figura 7 - Localização do marco topográfico na área da pista.	30
Figura 8 - (1) demarcação do local da coleta, (2) fase preliminar da coleta, (3) preparação para retirada da amostra, (4) amostra pronta para ser retirada, (5) retirada da amostra, (6) amostra acondicionada.	31
Figura 9 – (a) acréscimo de água; (b) colocação solo no cilindro; (c) compactação; (d) arrasamento; (e) cilindro rasado.	35
Figura 10 – peneiras, proveta, régua biselada, disco espaçador, extensômetro, cilindro, soquete, sobrecarga e disco poroso.	37
Figura 11 - Prensa de CBR.....	38
Figura 12 – (a) Amostras preparadas para imersão; (b) imersão das amostras; (c) escoamento de água em excesso pós-imersão; (d) execução do ensaio CBR.....	38
Figura 13 – (a) preparo inicial; (b) moldagem do corpo de prova com um faca; (c) amostra moldada no cilindro; (d) arrasamento e retirada de 6,6cm de solo do cilindro; (e) verificação da espessura de solo retirada; (f) amostra prova para imergir.	39
Figura 14 - Esquema da execução do DCP em laboratório.	41
Figura 15 – (a) execução do ensaio DCP em amostra; (b) local da execução na amostra. ...	42
Figura 16 - Execução do ensaio DCP <i>in situ</i>	43
Figura 17 - Distribuição Granulométrica do material	45
Figura 18 - Gráfico de Plasticidade de Casagrande.....	47
Figura 19 - Gráfico CBR solo indeformado.	49
Figura 20 - Ensaio Proctor das Energias Normal e Intermediária.	51
Figura 21 - Expansão - Energia Normal e Intermediária.....	52
Figura 22 - Ensaio CBR - Energia Normal - w=16%.....	52
Figura 23 - Ensaio CBR - Energia Normal - w=19%.....	53
Figura 24 - Ensaio CBR - Energia Normal - w=22,4%.	54
Figura 25 - Ensaio CBR - Energia Normal - w=25,5%.	55
Figura 26 - Ensaio CBR - Energia Normal - w=28,7%.	55

Figura 27 - Ensaio CBR - Energia Intermediária - w=20,4%.....	56
Figura 28 - Ensaio CBR - Energia Intermediária - w=21,1%.....	57
Figura 29 - Ensaio CBR - Energia Intermediária - w=22,8%.....	57
Figura 30 - Ensaio CBR - Energia Intermediária - w=24,8%.....	58
Figura 31 - Ensaio CBR - Energia Intermediária - w=26,9%.....	59
Figura 32 - Ensaio CBR - Energias Normal e Intermediária.....	60
Figura 33 - Correlação encontrada pelo Autor.	61
Figura 34 - Comparativo entre comportamentos das correções.	62
Figura 35 - Perfil de Resistencia da Pista de Testes através dos ensaios DCP <i>in situ</i>	66
Figura 36 - Perfil de Resistência da Pista de Testes utilizando correlação encontrada e comparação da mesma com correlações fornecida pela Norma DCP da ASTM.	66
Figura 37 - Perfil de CBR obtido por meio da correlação estabelecida neste trabalho.	67
Figura 38 - Perfil de CBR obtido por meio da “correlação norma 1” da ASTM D6951-09.	68
Figura 39 - Perfil de CBR obtido por meio da “correlação norma 2” da ASTM D6951-09.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Planilha de resultados do ensaio DCP.....	24
Tabela 2 - Correlações existentes	25
Tabela 3- Correlações da Norma D6951-09.....	27
Tabela 4 - Tabela ensaio CBR.....	39
Tabela 5 – Composição granulométrica do material.....	46
Tabela 6 – Propriedades físicas do solo estudado.....	46
Tabela 7 - Classificação HRB.....	48
Tabela 8 - Ensaio CBR do Solo Indeformado.....	48
Tabela 9 - Expansão do solo indeformado.....	49
Tabela 10 - Ensaio DCP - amostra indeformada.....	50
Tabela 11 - Ensaio de Compactação (PROCTOR) - Energia Normal.....	50
Tabela 12 - Ensaio de Compactação (PROCTOR) - Energia Intermediária.....	50
Tabela 13 - Expansão após 4 dias - Energia Normal e Intermediária.....	51
Tabela 14 - Ensaio DCP - Energia Normal - w=16%.....	53
Tabela 15 - Ensaio DCP - Energia Normal - w=19%.....	53
Tabela 16 - Ensaio DCP - Energia Normal - w=22,4%.....	54
Tabela 17 - Ensaio DCP - Energia Normal - w=25,5%.....	55
Tabela 18 - Ensaio DCP - Energia Normal - w=28,7%.....	56
Tabela 19 - Ensaio DCP - Energia Intermediária - w= 20,4%.....	56
Tabela 20 - Ensaio DCP - Energia Intermediária - w= 21,1%.....	57
Tabela 21 - Ensaio DCP - Energia Intermediária - w= 22,8%.....	58
Tabela 22 - Ensaio DCP - Energia Intermediária - w= 24,8%.....	58
Tabela 23 - Ensaio DCP - Energia Intermediária - w= 26,9%.....	59
Tabela 24 - Resultados do Ensaio CBR - Energia Normal.....	59
Tabela 25 - Resultados Ensaio CBR - Energia Intermediária.....	59
Tabela 26 - Resultados do CBR e DCP de cada corpo de prova.....	61
Tabela 27 - Comparação das correlações do Autor e da Norma DCP da ASTM.....	64

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. JUSTIFICATIVA	15
1.2. OBJETIVO GERAL	16
1.3. OBJETIVOS ESPECIFICOS	17
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. O CBR – <i>CALIFÓRNIA BEARING RATIO</i>	19
2.2. O DCP – <i>DYNAMIC CONE PENETROMETER</i>	20
2.2.1. Generalidades.....	20
2.2.2. Descrição do equipamento DCP	22
2.3. CORRELAÇÕES DCP X CBR	24
3. METODOLOGIA	28
3.1. LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES PRÉ-EXISTENTES.....	29
3.2. CAMPANHA EXPERIMENTAL	30
3.2.1. Coleta de amostras deformadas e indeformadas	30
3.2.2. Caracterização física do solo estudado.....	32
3.2.3. Definição dos parâmetros de compactação do material.....	34
3.2.4. Execução de ensaios CBR.....	36
3.2.5. Execução do ensaio DCP.....	40
3.3. ESTABELECIMENTO DE CORRELAÇÕES E APLICAÇÃO NO CAMPO.....	43

4. RESULTADOS	45
4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	45
4.2. ENSAIOS DE CBR e DCP NO SOLO INDEFORMADO	48
4.3. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO, CBR e DCP EM LABORATÓRIO	50
4.4. ESTABELECIMENTO DE CORRELAÇÕES ENTRE CBR E DCP.	61
4.5. ENSAIOS DE DCP EM CAMPO.	63
5. CONCLUSÃO	70
ANEXO I – Projeto Geométrico da Pista de Testes da UFSC – Joinville.	73
ANEXO II – Relação CBR <i>versus</i> Profundidade em função da extensão da Pista de Testes.	74
ANEXO III – Ensaio de Granulometria e Sedimentação.	75
ANEXO IV – Ensaio para determinação do PERG	76
ANEXO V – Limites de Liquidez (LL) e Plasticidade (LP)	77
ANEXO VI – Cálculo do Limite de Liquidez (LL)	78
REFERÊNCIAS	79

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

Conhecer a capacidade de suporte de um solo pós-compactado que será utilizado em um projeto rodoviário é essencial para garantir um bom desempenho do pavimento ao longo de sua vida útil. Tal informação é possível de ser obtida por meio de diversos ensaios, dentre eles o ensaio “Índice de Suporte Califórnia – ISC” também conhecido como *Califórnia Bearing Ratio* – CBR. Este ensaio possui duas alternativas de execução: *in situ* e laboratorial. O primeiro, pela sua demora de execução e seu custo de equipamento, é pouco utilizado no Brasil (CARVALHO, 2005), e por isso, em âmbito nacional o ensaio laboratorial é o predominante.

No entanto, apesar do CBR ser um ensaio bastante difundido no mundo, possuindo mais de 80 anos de estudo e execução, são levantadas críticas contra ele, tanto para o CBR laboratorial quanto para o CBR *in situ*. Tais críticas dizem respeito ao cuidado na coleta e transporte das amostras, os danos causados na área de coleta, na qual o solo já se apresentará compactado, o tempo decorrido da coleta da amostra até os resultados e a profundidade abrangida pelo ensaio.

Ressalta-se que, mesmo com essas críticas, o CBR é um ensaio bastante aceito no meio técnico e a experiência acumulada tem mostrado que projetos executados a partir dos resultados de ensaios CBR podem ser confiáveis. Porém, é relevante buscar técnicas que avaliam a capacidade de suporte de forma simples e expedita, os quais possam auxiliar o CBR no estudo e controle de qualidade em obras de pavimentação, as quais abrangem, muitas vezes, grandes áreas.

O DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*), o qual segue a norma norte-americana ASTM D6951-09, é um ensaio destinado a avaliar a sequência, espessura e o índice de suporte *in situ* de uma camada de material, seja ele solo ou rocha, que compõe uma estrutura de pavimento, através do equipamento também chamado DCP. O ensaio consiste na penetração de um cone no solo através de sucessivos golpes de um martelo, que cai de uma altura de queda padronizada (IDOT, 2005).

Segundo o Departamento de Transporte de Illinois (IDOT, 2005), o DCP é um ensaio de execução fácil e simples, com capacidade de prospectar profundidades de até 900 mm. A execução deste ensaio se dá em tempo reduzido, o qual se torna útil na investigação de grandes áreas, principalmente. Ainda segundo IDOT (2005), o

ensaio DCP é facilmente correlacionado com outros ensaios, dentre eles o CBR. Além dos aspectos citados, IDOT (2005) enfatiza que se trata de um equipamento de fácil fabricação.

Com isso, este ensaio se torna uma boa alternativa para reduzir o tempo e simplificar avaliações do estado de compactação de solos. Tendo isto em vista, procuram-se gerar correlações entre os ensaios DCP e CBR a fim de otimizar análises e avaliações geotécnicas.

O local tido como estudo de caso para este trabalho é a futura pista de testes do futuro campus de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que se encontra em obras e, estando atualmente exposta a camada que se refere ao reforço de subleito. Tal pista terá como objetivo propiciar estudos relativos ao desenvolvimento de veículos e de tecnologias de pavimentação. Como no futuro serão avaliadas performances de diferentes pavimentos, é necessário que se tenham camadas de terraplenagem relativamente homogêneas, reduzindo o número de variáveis que influenciem no comportamento dos pavimentos testados.

Tendo em vista que o DCP é um ensaio que pode ser facilmente correlacionado com o ensaio CBR e tem a capacidade de prospectar profundidades consideráveis, é possível, com isso, criar perfis de compactação de solos, não apenas longitudinalmente, mas também ao longo de sua profundidade. Por isso, busca-se correlacionar o ensaio DCP e CBR a fim de avaliar o estado de compactação dos solos de uma maneira rápida e ao mesmo tempo tornar esta avaliação mais abrangente.

1.2. OBJETIVO GERAL

Este trabalho objetiva correlacionar os índices de suporte obtidos por meio dos ensaios CBR e DCP, relativos ao solo que compõe o reforço do subleito da pista de testes localizada no campus da Universidade Federal de Santa Catarina, em Joinville, e avaliar a homogeneidade em termos de capacidade de suporte daquela camada de subleito.

1.3. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar ensaios de CBR *in situ* e laboratoriais para determinar a capacidade de suporte do solo da pista de testes da UFSC.
- Executar ensaios DCP em campo e laboratório.
- Determinar correlações entre os resultados dos ensaios CBR e DCP;
- Estabelecer perfis de variação de CBR ao longo da área estudada por meio da técnica DCP, tanto longitudinalmente, quanto em profundidade.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, sendo eles: Introdução, Referencial Bibliográfico, Metodologia de Projeto, Resultados e Conclusão. O Capítulo 1 trata da Introdução do trabalho, onde é apresentada a justificativa do trabalho, contextualizando o tema abordado, bem como o objetivo geral e objetivos específicos.

O capítulo 2 apresenta o Referencial Bibliográfico do trabalho. Nele se explicam os detalhes dos ensaios CBR e DCP, como generalidades, especificações dos equipamentos e normas regentes. Neste capítulo também são apresentadas correlações existentes na literatura técnica e discussões sobre os mesmos.

O material estudado e a Metodologia empregada estão apresentados no Capítulo 3, onde são informados os levantamentos preliminares para execução do trabalho, como características geométricas da pista de testes, características do material empregado como reforço, local de estudo, normas utilizadas para execução dos ensaios e os locais onde foram executados os ensaios DCP e coletas para execução do CBR. Também na Metodologia é descrita a maneira como os ensaios de caracterização, Proctor, CBR e DCP foram executados, tanto os ensaios laboratoriais, como os ensaios executados *in situ*.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos dos ensaios Proctor, CBR e DCP, bem como resultados da caracterização física do solo. Tais dados são determinantes para estabelecimento de correlações entre o CBR e DCP. Discussões e comparativos foram feitos com correlações existentes e que são apresentadas no capítulo 2. O trabalho também apresentou o perfil de compactação do reforço da

pista, tanto longitudinalmente, quanto em profundidade, utilizando a correlação aqui estabelecida.

As conclusões sobre o trabalho estão no capítulo 5.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O CBR – CALIFÓRNIA BEARING RATIO

O CBR (*Califórnia Bearing Ratio*), traduzido para Índice de Suporte Califórnia (ISC) no Brasil, é um ensaio que fornece a capacidade de suporte de um determinado solo, comumente chamado de índice de penetração. Tal índice pode ser utilizado para o dimensionamento de um pavimento, como sugere o manual de pavimentação do DNIT (2006).

Este ensaio foi criado na Califórnia pelo engenheiro O. J. Porter no final dos anos 30 (SENÇO, 2007). Posteriormente, o CBR, com a ajuda de estudos realizados pela *United States Corps of Engineers* (USACE) na década de 40 e pelo engenheiro Murilo Lopes de Souza na década seguinte, foi modificado para atender problemas de pavimentação (SOUZA, 2007).

Yoder e Witczac (1975) *apud* Souza (2007), explicam que o CBR passou por modificações durante a 2ª Guerra Mundial, as quais foram implementadas pela USACE, pois a mesma procurou empregar o índice de suporte para fins de pavimentação em aeroportos militares. Posteriormente, o ensaio contendo estas modificações foi reconhecido nos Estados Unidos pela *Association of State Highway Officials* (AASHO).

No Brasil, há duas normas que regem o ensaio CBR: a NBR 9895/87 – Solos – Índice de Suporte Califórnia (ABNT) e a DNER-ME 049/94 – Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia, utilizando amostras não trabalhadas (DNER). Segundo Souza (2007) as mesmas diferem apenas na quantidade de leituras utilizadas no estabelecimento da curva penetração x pressão. No entanto cabe salientar que o procedimento de determinação de absorção de água também não consta na norma NBR 9895/87, embora seja mencionada na DNER-ME 049/94.

O ensaio CBR é um ensaio difundido em todo o mundo, e estudos relacionados à sua aplicação são desenvolvidos há décadas. Além disso, seus resultados se mostram válidos para análise da capacidade de suporte de solos. Porém, o mesmo possui algumas desvantagens no seu uso, as quais são:

- Este ensaio quando executado em amostras indeformadas é destrutivo, ou seja, necessita utilizar uma área relativamente grande de solo para obtenção

das amostras para o ensaio (BERTI, 2005), degradando solos já compactados.

- Levando em conta que o solo precisa estar indeformado, é fundamental que o operador tenha considerável cuidado com a retirada do material, evitando amolgamento da amostra.
- O transporte também necessita de cuidados. Da mesma forma que o operador deve ter cuidado com a retirada do solo, a transferência para o laboratório deve ser feita de modo que não acarrete em amolgamento do mesmo.
- A execução do ensaio também está propícia a erros devido ao fator humano, como erros na homogeneização da umidade na amostra, aumentando, assim, a probabilidade de distorções no resultado do índice de suporte do solo obtido através do CBR, mesmo em materiais com mesma capacidade de suporte.
- É um ensaio demorado, sendo necessários quatro dias para se obter os resultados (DNER, 1994).
- Com relação à profundidade abrangida, o ensaio CBR faz a análise de apenas 11,4 cm de altura de solo coletado (DNER, 1994).

2.2. O DCP – DYNAMIC CONE PENETROMETER

2.2.1. Generalidades

O DCP é um ensaio que mede a resistência à penetração de um dado solo. Tal medida permite estimar, *in situ*, através de correlações, o índice de suporte de um material que se alcançaria executando um ensaio CBR *in situ* (BERTI, 2005). O ensaio pode ser realizado *in situ* ou em laboratório. Quando executado em campo, não há a necessidade de coleta de solo. Se executado em laboratório, são utilizados corpos de prova compactados, de forma semelhante ao CBR. Segundo o IDOT (2005), o DCP se aplica para aferição da capacidade de suporte em camadas de base e sub-bases, tal como em subleitos.

O ensaio foi criado na Austrália na década de 1950 por Scala e tinha o nome de *Scala Penetrometer*. Posteriormente, na África do Sul, Van Vuuren (1969) modificou este ensaio e passou a chamá-lo de *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP), traduzido para Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP). A partir daí, segundo

Carvalho (2005), o DCP foi utilizado em pesquisas em diversos países, dentre os quais: Argentina, Brasil, Chile, Estados Unidos, Inglaterra, Israel, Malásia, Sri Lanka, e Tailândia.

Carvalho (2005) comenta que a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) ajudou a padronizar o ensaio, criando a primeira norma técnica internacional para o mesmo, a D6951-03. Tal norma versa sobre a padronização do equipamento e da execução do ensaio. A mais recente revisão desta norma foi publicada em 2009.

Segundo Alves (2002) o ensaio DCP pode ser classificado como semi não-destrutivo, já que o procedimento *in situ* envolve apenas a execução de pequenos furos no solo estudado. Por conseguinte, tem-se a obtenção dos dados sem que a estrutura da camada de solo estudada seja alterada. Abaixo, na Figura 1, está representada a execução do ensaio DCP *in situ*.

Figura 1 - Execução do ensaio DCP em campo



Fonte: Alves, 2002.

Além disso, existem benefícios na utilização do DCP nos quesitos custo, profundidade estudada, facilidade e velocidade de operação. Segundo o Departamento de Transporte de Illinois (IDOT, 2005), o custo para obter um

instrumento DCP é relativamente baixo, e além de encontrar-se disponível no comércio, o instrumento é de fácil fabricação. A profundidade prospectada é de 900 mm, o que possibilita uma análise não apenas da porção mais superficial do terreno.

O IDOT (2005) ainda menciona a simplicidade de execução do ensaio DCP para obter dados de um solo. O ensaio é realizado *in situ*, o qual diminui o tempo de execução e a chance de deformações nos solos quando amostras precisam ser transportadas. Selig e Waters (1994), *apud* Berti (2005, p. 30), mencionam que “para manusear o equipamento durante o teste requer-se somente uma equipe de pelo menos dois ou três operadores, o que torna o ensaio bastante rápido, consumindo aproximadamente 5 minutos por perfuração”.

Por fim, este ensaio se torna uma boa alternativa para auxiliar o ensaio CBR na avaliação da capacidade de suporte do solo, visto que é um ensaio simples, expedito e de fácil conversão de seus resultados para outros índices (IDOT, 2005), dentre eles o CBR, conforme demonstrado em diversas correlações existentes na literatura.

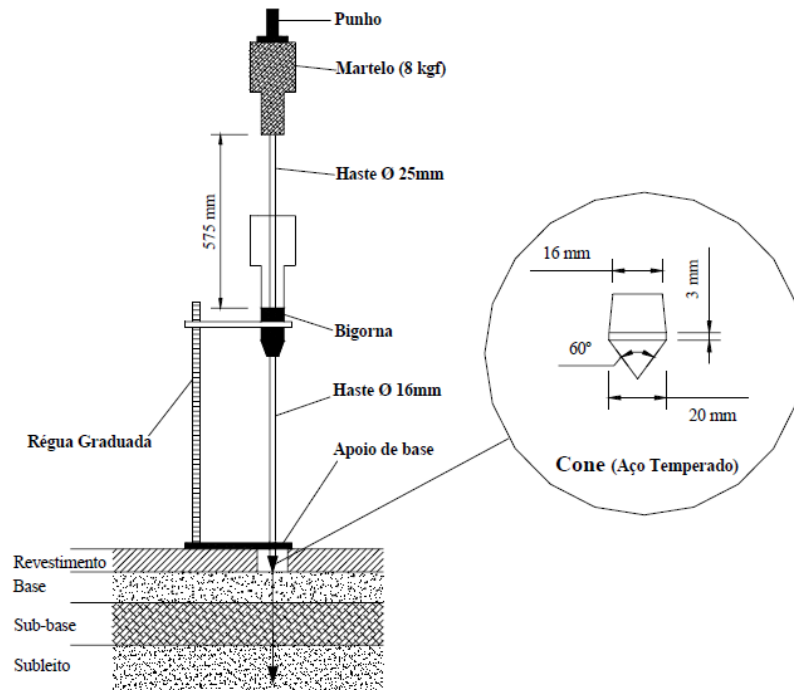
2.2.2. Descrição do equipamento DCP

O DCP utilizado neste trabalho será o que, segundo Fontes (2001), foi desenvolvido pela *Central African Standard* e modificado pela *Transvaal Roadment* (TRD) em 1973. O equipamento é constituído pelas seguintes peças:

- Uma barra de aço de 16 mm de diâmetro;
- Uma barra de aço de 25 mm de diâmetro
- Uma ponta um cone de aço com 20 mm de diâmetro de base e ângulo de 60°;
- Um martelo de aço, com peso de 8 Kg;
- Uma barra de aço de 25 mm de diâmetro e;
- Uma régua com graduação em milímetros.

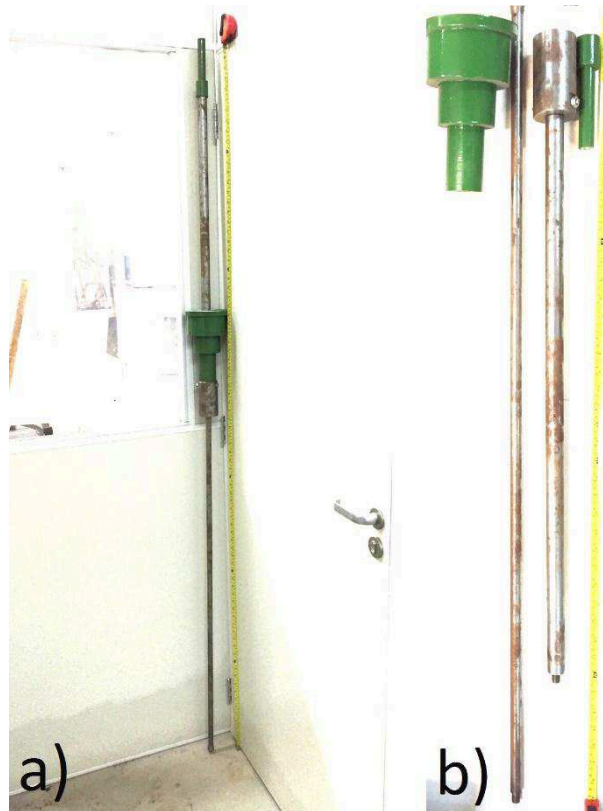
A seguir, a Figura 2 mostra o equipamento, com seus componentes descritos. Já a Figura 3 apresenta uma foto real do equipamento DCP.

Figura 2 - Equipamento do ensaio DCP



Fonte: Lima, 2000

Figura 3 – (a) Equipamento DCP-UFSC-Joinville; (b) peças componentes do DCP.



Fonte: Autor, 2015.

De acordo com a norma ASTM D6951-09, o procedimento do ensaio é simples. Primeiramente, posiciona-se o equipamento na vertical e então se aplicam pancadas com o martelo no mesmo, fazendo com que a ponta, juntamente com a barra de 16 mm sejam cravadas no solo. A altura de queda é padronizada, sendo de 575 mm.

Assim, com o auxílio da regra graduada, leituras de penetração são feitas, de forma a verificar quantos milímetros são cravados a cada golpe aplicado. Tal medida resulta no DN (índice de penetração ou penetração por golpe), valor o qual se refere ao resultado do ensaio DCP e é dado em mm/golpe. Os dados obtidos no ensaio são organizados conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1- Planilha de resultados do ensaio DCP

Operador:			
Local:			
Data:			
Número de golpes	Penetração Acumulada (mm)	Penetração entre leituras (mm)	Penetração por golpe (mm/golpe)
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-

Fonte: adaptado pelo autor ASTM, 2009, p. 4

Um dos operadores deve segurar o equipamento de modo que permaneça na vertical. Para isso é útil o emprego de um nível de bolha junto ao equipamento. O segundo operador aplica os golpes com o martelo, respeitando a altura de queda, e o último deve efetuar a leitura dos resultados. A profundidade do ensaio é geralmente limitada a 900 mm.

2.3. CORRELAÇÕES DCP X CBR

Na literatura há uma série de trabalhos que correlacionam os resultados dos ensaios DCP e CBR. Entre os autores que realizaram esses estudos podem ser citados Kleyn e Savage (1982), Harison (1987) e Ponce et al. (1991). Em âmbito nacional citam-se os trabalhos de Heyn (1986), Vertamatti e Oliveira (1997) e

Trichês e Cardoso (1998). Tais trabalhos diferem entre si com relação ao tipo de solo, região e condições em que o solo se encontra no momento da execução do ensaio.

As correlações entre CBR e DCP são obtidas através de diversos ensaios feitos em diferentes condições. Com eles, busca-se sempre a relação do índice de suporte dado pelo CBR e o índice de penetração (DN) fornecido pelo DCP (BERTI, 2005). A Tabela 2 apresenta todas as correlações citadas neste capítulo, separadas por tipo de solo e autor. Alguns autores não citaram o tipo de solo, mas sim o local de origem do material investigado.

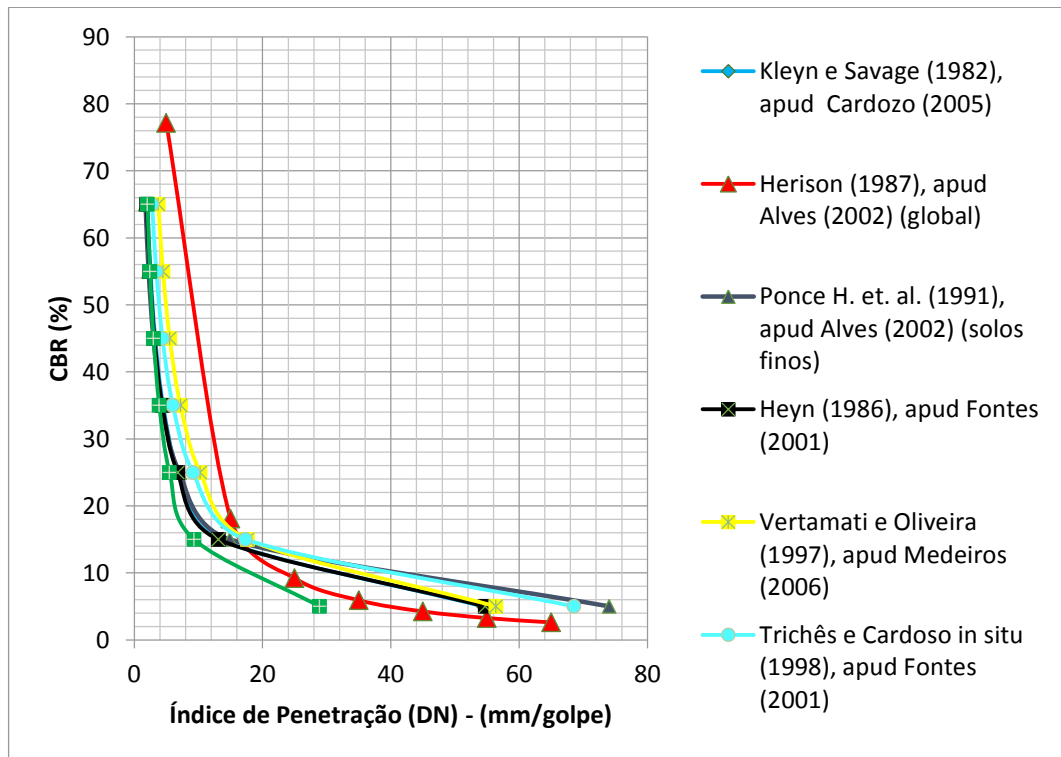
Tabela 2 - Correlações existentes

Tipo de Solo	Correlação	R²	Fonte
Não Fornecido / Local: África do Sul	$Log(CBR) = 2,63 - 1,28 .Log (DN)$	-	KLEYN E SAVAGE (1982), apud CARDOZO (2005)
Argilosos	$Log(CBR) = 2,56 - 1,16 .Log (DN)$	0,97	HARISON (1987), apud ALVES (2002)
Arenosos	$Log(CBR) = 3,03 - 1,51 .Log (DN)$	0,92	
Pedregulhos	$Log(CBR) = 2,55 - 0,96 .Log(DN)$	0,96	
Para todos os tipos de Solos	$Log(CBR) = 2,81 - 1,32 .Log (DN)$	0,98	
Solos Finos / Local: Chile	$Log(CBR) = 2,89 - 1,46 .Log (DN)$	0,95	PONCE H. et. al. (1991), apud ALVES (2002)
Não Fornecido / Local: Paraná	$CBR = 443,45 .(DN)^{-1,30}$	-	HEYN (1986), apud FONTES (2001)
Latossolos Vermelho e Vermelho-amarelo / Local: ITA	$Log(CBR) = 2,490 - 1,057 .Log(DN)$	-	VERTAMATTI E OLIVEIRA (1997), apud MEDEIROS (2006)
Não Fornecido / Local: Santa Catarina	$CBR = 512,64 .(DN)^{-1,25} in situ$	-	TRICHÊS E CARDOSO (1998), apud FONTES (2001)
	$CBR = 151,58 .(DN)^{-1,03} Dimensionamento$	-	

Fonte: Autor (2015)

Na Figura 4 as correlações apresentadas na Tabela 2 são expressas graficamente.

Figura 4 - Correlações apresentadas graficamente.



Fonte: Autor, 2015.

Efetuada uma análise do gráfico, nota-se a semelhança de comportamento das diversas correlações apresentadas. Estas possuem natureza bi-linear, havendo uma inflexão das curvas quando o valor de CBR é próximo de 15%. Assim, identifica-se neste nível de CBR uma clara transição de comportamento do solo frente à penetração do DCP.

Também se percebe que em solos que apresentaram índices de penetração (DN) acima de 20 mm/golpe, ocorre menor divergência de resultados entre as correlações, se comparado às situações em que DN é inferior a 20mm/golpe. Nestes casos a discrepância de resultados é mais elevada. Pode-se citar como exemplo solos com DN = 40 mm/golpe, onde as correlações apontam para valores de CBR entre 4% e 10%, ao passo que em solos com DN = 5 mm/golpe o intervalo de CBR previsto varia de 25% a 45%.

A discrepância existente entre as correlações pode ser atribuída ao fato de que foram desenvolvidas para diferentes tipos de solos e condições de compactação.

Por fim, vale ressaltar que a norma do ensaio DCP, ASTM D6951-09, traz correlações pré-estabelecidas, baseadas nas características do solo, e estão

dispostas na Tabela 3, abaixo (ASTM, 2009). Estas correlações são empregadas para DN medido em milímetros por golpe.

Tabela 3 - Correlações da Norma D6951-09

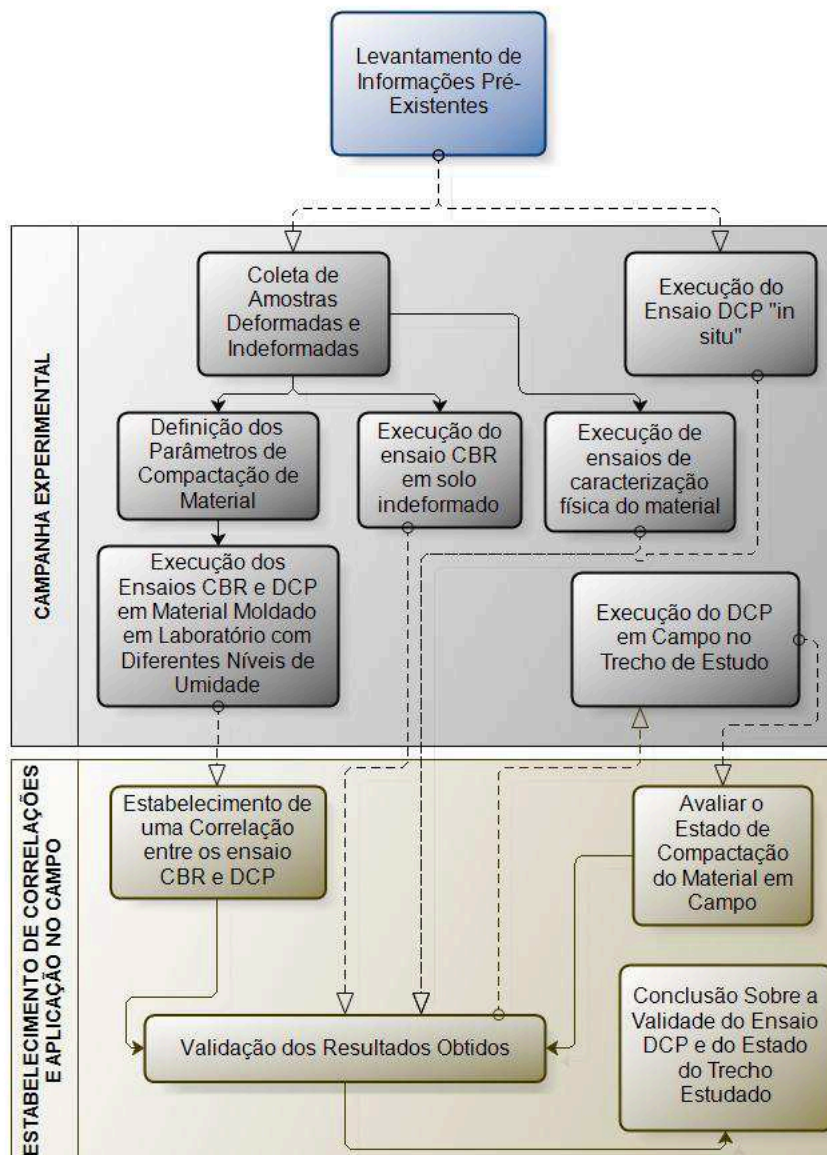
CORRELAÇÕES	TIPO DE SOLO
$CBR = \frac{292}{DN^{1,12}}$	Para todos os solos exceto para Argilas com baixa plasticidade com CBR<10% e argilas altamente plásticas.
$CBR = \frac{1}{(0,432283 \times DN)^2}$	Para Argilas com baixa plasticidade com CBR<10%.
$CBR = \frac{1}{(0,002871 \times DN)}$	Para Argilas altamente plásticas.

Fonte: Adaptado pelo autor ASTM,2009, p. 4.

3. METODOLOGIA

Foram necessárias três etapas para correlacionar os ensaios CBR e DCP, e avaliar as condições atuais de compactação do solo que se destina ao subleito da pista de testes da UFSC – Joinville. Estas etapas são: o levantamento de informações pré-existentes, a campanha experimental e o estabelecimento de correlações e aplicação no campo. Cada etapa é constituída por diferentes atividades. A Figura 5 apresenta a metodologia que foi empregada neste trabalho, sob forma de um fluxograma.

Figura 5 - Fluxograma da metodologia.



Fonte: Autor, 2015

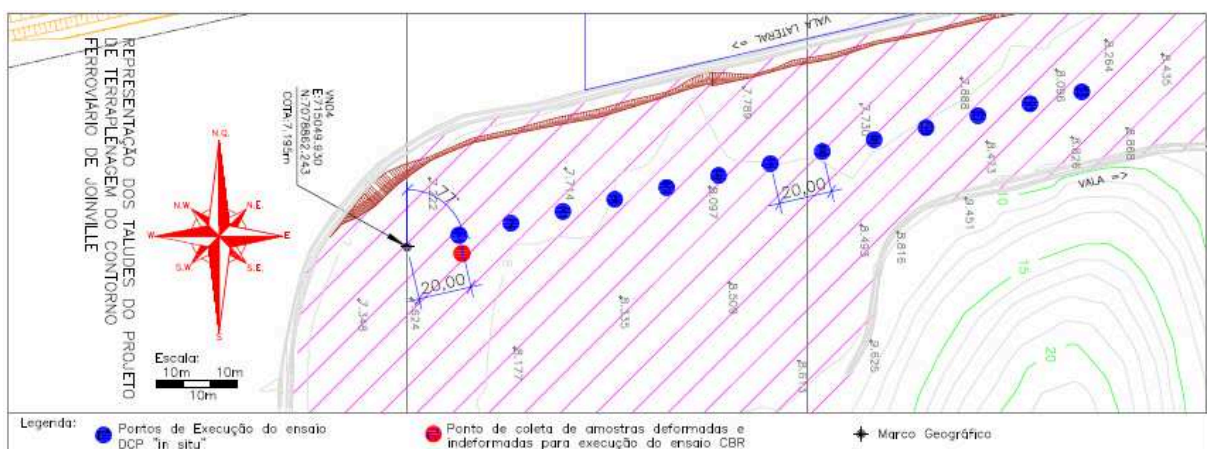
3.1. LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES PRÉ-EXISTENTES

O objetivo da fase preliminar do trabalho foi compilar pesquisas bibliográficas referentes aos aspectos técnicos relacionados aos ensaios CBR e DCP, bem como conhecer as características geotécnicas do solo e a topografia da pista de testes tomada como estudo de caso.

O local tido como estudo de caso é a pista de testes da UFSC na cidade de Joinville, a qual está em fase de construção. Suas coordenadas são 26°23'40.2"S 48°50'40.1"W. Ela não possui elevações e a camada de reforço do subleito é composta por um solo residual de gnaiss compactado, solo este proveniente de cortes executados para terraplenagem dos locais onde serão construídos os prédios do referido. Atualmente a camada de subleito encontra-se exposta, aguardando a continuidade dos processos de compactação.

Como apresentado no Anexo I, a pista de testes possui um trecho em reta e seu restante em curvas com diferentes raios de curvatura. O trecho utilizado para execução dos ensaios foi a parte retilínea da pista, o qual tem uma extensão aproximada de 460 metros. Os ensaios de DCP *in situ* foram executados a cada 20 metros e o local da coleta das amostras para execução dos ensaios CBR tem distância de 20 metros da marcação topográfica “VN04”, fazendo um ângulo de 77° do Azimute, como discriminado na Figura 6. A quantidade de pontos para a execução do ensaio DCP *in situ* foi treze, abrangendo, portanto, 240 metros lineares da pista. A Figura 7 apresenta a localização do marco topográfico “VN04” na pista.

Figura 6 - Pontos de execuções e coleta na pista de testes.



Fonte: modificado por Autor, UFSC, 2015.

Figura 7 - Localização do marco topográfico na área da pista.



Fonte: Autor, 2015.

3.2. CAMPANHA EXPERIMENTAL

Esta etapa contempla a coleta de amostras e execução de ensaios de caracterização física básica, compactação Proctor, CBR e DCP. Os resultados obtidos foram utilizados no estabelecimento de correlações entre os ensaios, bem como a avaliação do estado de compactação do aterro constituinte da pista de teste.

3.2.1. Coleta de amostras deformadas e indeformadas

Inicialmente foram coletadas amostras deformadas e indeformadas em um ponto da pista de testes, conforme mostrado na Figura 6. Os pontos de coleta foram determinados *in loco*, no momento da retirada. Como mencionado na seção 3.1, o ponto de coleta está localizado a 20 metros de distância e faz um ângulo de 77° com norte geométrico do marco topográfico VN04.

A obtenção de amostras indeformadas exigiu extremo cuidado, tanto na coleta quanto no transporte. Isto porque foi necessário manter o solo nas mesmas condições estruturais, de umidade e de peso específico encontradas no campo. Na Figura 8 é demonstrada a sequência da coleta e condicionamento da amostra indeformada tomando-se sempre o cuidado de mantê-la em suas condições ditas naturais.

Figura 8 - (1) demarcação do local da coleta, (2) fase preliminar da coleta, (3) preparação para retirada da amostra, (4) amostra pronta para ser retirada, (5) retirada da amostra, (6) amostra acondicionada.



Fonte: Autor, 2015.

Primeiramente, foi necessário demarcar a área que seria usada para a retirada da amostra indeformada. Também da fase de demarcação, 5 a 10 centímetros de espessura do material foram retirados de sua superfície, visto que tal camada pode ter sofrido mudanças em sua composição devido ao transporte de sedimentos através da chuva, por exemplo.

Posterior a essa fase, fez-se a coleta do bloco indeformado. A sequência utilizada para tal foi começar a remover o material da periferia da área de coleta com pá e picareta, seguindo para o centro e interrompendo a remoção quando o volume de solo fosse próximo do satisfatório para moldagem do corpo de prova para o ensaio CBR. A partir daí o processo de corte foi feito com faca e espátula.

A faca foi utilizada também para remover o solo da parte de baixo da amostra e facilitar o desprendimento da mesma. Após o trabalho com a faca, as laterais da amostra foram envolvidas com filme plástico, com o objetivo de fornecer maior integridade à amostra e manter a condição de umidade natural do solo. Posteriormente, posicionou-se a pá na parte de baixo da amostra e cortou-se a parte da amostra que ainda estava em contato com o terraplano.

Com a amostra indeformada já retirada do campo, a mesma foi completamente envolvida com mais filme plástico e plástico bolha. Tal procedimento é necessário para proteger o material contra pequenos impactos, além de conservar suas condições estruturais, de umidade e densidade.

A coleta da amostra deformada para realizar os ensaios de compactação e CBR com amostras moldadas em laboratório foi feita concomitantemente à coleta de amostra indeformada. O solo removido com pá e picareta na fase preliminar da coleta da amostra indeformada foi armazenado em sacos e levado ao laboratório.

3.2.2. Caracterização física do solo estudado

O solo estudado neste trabalho foi submetido a ensaios de caracterização física, como Granulometria, Peso Específico Real dos Grãos (PERG) e Limites de Liquidez (LL) e Plasticidade (LP). Devido à insuficiência de ferramentas para execução das mesmas, uma amostra de 1 kg de material foi levada ao Laboratório de Geotecnologia (LageoTec) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) para execução destes ensaios.

A análise granulométrica foi executada conforme a norma da ABNT NBR-7181/84. Tal análise requereu cerca de 70 g de solo previamente preparado, além de 100 g de solo para análise da umidade do material. Para o material passante na peneira 0,075 mm, executou-se o ensaio de sedimentação no solo, a fim de conhecer o percentual de argila e silte do mesmo. No ensaio de sedimentação empregou-se hexametáfosfato de sódio como solução defloculante.

Solos com diâmetros inferiores a 0,002 mm foram considerados argilas. Grãos com diâmetros entre 0,002 e 0,06 mm foram classificados como solos siltosos, seguindo a norma da ABNT NBR 6502/95.

Para o ensaio do peso específico real das partículas de solo, seguiu-se a ABNT NBR 6508/84. Com o recipiente de volume controlado empregou-se um balão volumétrico com 500 cm³ de capacidade. Empregou-se cerca de 100 g de solo seco para realização do ensaio. O peso específico real das partículas do solo pode ser calculado a partir da seguinte fórmula:

$$\delta = \frac{M_1 \cdot 100 / (100 + h)}{\left[M_1 \cdot \frac{100}{100 + h} \right] + M_3 - M_2} \cdot \delta_T$$

Onde: M_1 é a massa do solo úmido, M_2 é a massa do picnômetro + solo + água, M_3 é a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência, h é a umidade inicial da amostra e δ_T é a massa específica da água, que é dada em função de sua temperatura.

O ensaio para determinação do Limite de Liquidez do solo foi executado conforme norma da ABNT NBR 6459/84, empregando o aparelho de Casagrande. O procedimento de ensaio foi efetuado seis vezes. Com os resultados, gerou-se um gráfico, em que o eixo vertical corresponde ao teor de umidade da amostra, e o eixo horizontal, em escala logarítmica ao número de golpes necessários para o fechamento da ranhura aberta pelo cinzel, ao longo de aproximadamente 1 cm de extensão. Foi determinada por meio deste gráfico a umidade correspondente a 25 golpes, e esta se refere ao Limite de Liquidez (LL) do solo.

Por fim, executou-se o ensaio de Limite de Plasticidade (LP), o qual segue a norma ABNT NBR 7180/84. O ensaio consiste em moldar manualmente um cilindro de solo com 3 mm de diâmetro e aproximadamente 100 mm de comprimento, sobre uma placa de vidro texturizada. Uma vez que a umidade em que se encontra o solo permita a moldagem do cilindro de tal forma que o mesmo passe a mostrar indícios de fissuras, quando atingidas tais dimensões, o procedimento é assumido satisfatório. Para este trabalho foram executadas cinco vezes o procedimento acima descrito. Como resultado final fez-se a média das umidades dos mesmos, não tendo sido necessária a exclusão de qualquer um dos pontos experimentais, já que todos se mantiveram dentro do intervalo de variação aceitável. Esta média representa o

Limite de Plasticidade (LP) do material. Para encontrar o Índice de Plasticidade (IP), basta determinar a diferença entre LL e LP.

3.2.3. Definição dos parâmetros de compactação do material

A norma que estabelece os procedimentos para determinação dos parâmetros de compactação de solos é a ABNT NBR 7182/86 – Ensaio de Compactação, mais conhecido como Ensaio Proctor. Tal ensaio estuda o comportamento do peso específico do solo estudado com a variação da umidade do solo (ABNT, 1986, p. 1).

Os ensaios foram efetuados em amostras inicialmente secas ao ar, de forma que fosse atingida a umidade higroscópica. Devido à quantidade de solo disponível para a execução dos ensaios, optou-se por não reaproveitar as amostras. Com isso, separaram-se amostras de aproximadamente 6 kg e considerou-se que estavam com o mesmo teor de umidade. A partir daí, foi iniciado o Ensaio de Compactação.

Foram compactados, em um cilindro grande (com dimensões pré-determinadas pela norma), os solos coletados em campo em diferentes níveis de umidade, utilizando um soquete com peso de 4,5 kg caindo sobre uma altura de $45,7 \pm 2$ centímetros.

As energias de compactação utilizadas para a determinação das curvas de compactação foram a normal e intermediária, cujo número de golpes com o soquete é de 12 e 26, respectivamente. A compactação se deu em 5 camadas, de modo que suas espessuras somadas atingissem, aproximadamente, 11,5 centímetros de altura, correspondente à altura do cilindro decrescido da altura do disco espaçador. Após isso, fez-se o arrasamento da amostra com uma régua biselada.

Após a compactação, pesou-se o solo dentro do cilindro. Com o peso e volume do cilindro foi possível encontrar o peso específico do material por compactação, com determinada umidade. Depois de compactado, foi retirada uma amostra do solo para determinação da umidade em estufa.

Tal procedimento foi repetido sucessivas vezes de forma a obter quantidade suficiente de dados de densidade seca e umidade que permitisse a definição das curvas de compactação. A Figura 9 abaixo apresenta a sequência de execução do ensaio de compactação.

Figura 9 – (a) acréscimo de água; (b) colocação solo no cilindro; (c) compactação; (d) arrasamento; (e) cilindro rasado.



Fonte: Machado, 2015.

Com a execução deste ensaio, determinou-se a umidade ótima do material. Esta consiste na umidade com que o material chega a sua maior densidade, o qual se refere ao máximo estado de compactação do solo para determinada energia de compactação aplicada no ensaio (ABNT, 1986).

Esse ensaio foi importante para este trabalho para se conhecer a faixa de umidade do solo em que se teriam maiores variações do valor do CBR da amostra, buscando uma maior abrangência da correlação em relação ao índice de suporte. Caso fossem escolhidas umidades muito elevadas para a execução do ensaio CBR, além de comprometer a execução e resultados do ensaio, o CBR iria provavelmente variar entre valores muito baixos.

3.2.4. Execução de ensaios CBR

As amostras indeformadas foram submetidas ao ensaio CBR laboratorial. As normas que regem este ensaio são a ABNT NBR 9895/1987 e a DNER-ME 049-94. Para este trabalho, optou-se por seguir a norma ABNT NBR 9895/1987.

Os procedimentos para a execução do ensaio CBR foram os seguintes:

- 1) Executou-se a compactação do material, utilizando os mesmos materiais e métodos para o Ensaio de Compactação Proctor.
- 2) Após a compactação, removeu-se o disco espaçador da parte de baixo do cilindro e o mesmo foi virado e preso nas arruelas novamente.
- 3) Posicionou-se a sobrecarga na parte superior da amostra e imergiu-se o conjunto em um tanque com água, de modo que as amostras ficassem completamente submersas (Figura 12 (b)). Foram colocados ainda extensômetros a fim de se medir a expansão de cada amostra.
- 4) As amostras foram mantidas imersas durante quatro dias consecutivos. A norma estabelece que a expansão deva ser medida todos os dias até o quarto dia. No entanto, neste trabalho as expansões foram medidas apenas no quarto dia, antes de retirar as amostras da submersão, devido à impossibilidade do acompanhamento diário das amostras imersas.
- 5) Retiraram-se as amostras da água e deixou-se escorrer a água em excesso durante 10 a 15 minutos (Figura 12 (c)).
- 6) Em seguida a amostra foi posicionada na prensa para determinação da medida de capacidade de suporte, que corresponde ao ensaio CBR propriamente dito (Figura 12 (d)). Esse ensaio foi executado da seguinte forma:
 - i. Posiciona-se o cilindro no centro da prensa, de modo que o pistão da prensa enteja no centro do mesmo;
 - ii. Coloca-se a sobrecarga no interior da amostra. Inicia-se o ensaio, de modo a preencher a Tabela 4. Este consiste no carregamento do solo sob velocidade constante (1,27 mm/min), por meio de um pistão de 5 cm de diâmetro;
 - iii. Ao longo do ensaio mediu-se a força exercida pelo pistão em níveis de penetração pré-determinados.

Os equipamentos necessários para execução do ensaio de compactação e CBR (até a imersão) podem ser observados na Figura 10. A Figura 11 apresenta a prensa de CBR utilizada para execução do ensaio. A Figura 12 (d) apresenta o momento da execução do ensaio CBR.

Figura 10 – peneiras, proveta, régua biselada, disco espaçador, extensômetro, cilindro, soquete, sobrecarga e disco poroso.



Fonte: Autor, 2015.

Figura 11 - Prensa de CBR.



Fonte: Autor, 2015.

Figura 12 – (a) Amostras preparadas para imersão; (b) imersão das amostras; (c) escoamento de água em excesso pós-imersão; (d) execução do ensaio CBR.



Fonte: Autor, 2015

Tabela 4 - Tabela ensaio CBR.

Tempo	Penetração		Leitura no extensômetro do anel
	min	pol	mm
0,5	0,025	0,63	-
1	0,05	1,27	-
1,5	0,075	1,9	-
2	0,1	2,54	-
3	0,15	3,81	-
4	0,2	5,08	-
6	0,3	7,62	-
8	0,4	10,16	-
10	0,5	12,7	-

Fonte: adaptado pelo Autor ABNT,1987 p. 6.

Para o ensaio CBR da amostra indeformada, os procedimentos são iguais ao ensaio com amostras deformadas, diferindo apenas no preparo do corpo de prova. A Figura 13 apresenta a sequência de execução do preparo da amostra indeformada que foi submetida ao ensaio CBR.

Figura 13 – (a) preparo inicial; (b) moldagem do corpo de prova com um faca; (c) amostra moldada no cilindro; (d) arrasamento e retirada de 6,6cm de solo do cilindro; (e) verificação da espessura de solo retirada; (f) amostra prova para imergir.



Fonte: Autor, 2015.

Com a amostra na mesa, posicionou-se o cilindro de CBR sobre a amostra. Com uma faca de serra cortou-se cuidadosamente o solo da amostra de modo que esta atingisse as mesmas dimensões do cilindro. A cada centímetro de solo moldado, o cilindro era empurrado para baixo até que o mesmo estivesse completamente preenchido. Em seguida, foi retirado solo de dentro do cilindro até uma espessura de aproximadamente 6,6 cm, espessura correspondente ao disco espaçador. A partir daí, repetiu-se os procedimentos descritos anteriormente, a partir da etapa 3.

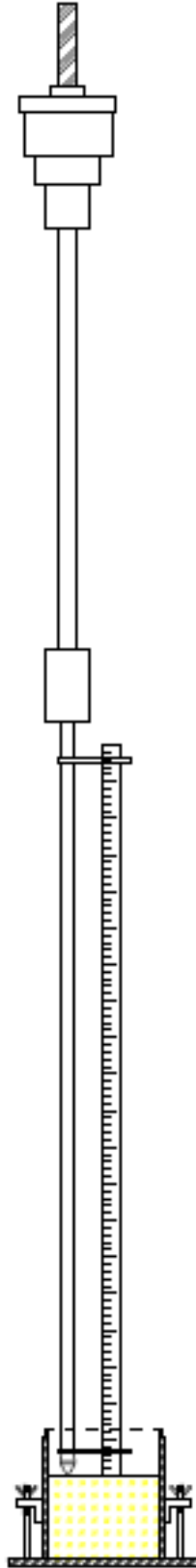
Estes ensaios foram executados de forma a validar as correlações entre CBR e DCP, e também de avaliar a existência de um possível fator campo-laboratório entre os resultados do ensaio obtidos em amostras preparadas em cada ambiente.

3.2.5. Execução do ensaio DCP

Outra etapa da campanha experimental foi a execução dos ensaios DCP em laboratório. A Figura 14 apresenta o esquema da forma como foi executado este ensaio. Executou-se o ensaio DCP em laboratório em todas as amostras, ainda nos cilindros, pós-ensaio CBR, nas superfícies que não foram afetadas pelo pistão da prensa, como apresentado na Figura 15 (b). Os ensaios eram encerrados quando o cone alcançava a parte inferior do cilindro, sendo sempre descartado a último golpe. Assim, o DN (mm/golpe) foi encontrado através da divisão do número de golpes executadas com a profundidade alcançada por esses golpes.

A Figura 15 (a) demonstra a execução do ensaio. A cada golpe com o martelo, foram anotados os milímetros penetrados pelo cone. O procedimento seguido para a execução deste ensaio está descrito no item 2.2.2 deste trabalho.

Figura 14 - Esquema da execução do DCP em laboratório.



Fonte: Autor, 2015

Figura 15 – (a) execução do ensaio DCP em amostra; (b) local da execução na amostra.



Fonte: Autor, 2015.

A fim de avaliar o estado de compactação do solo presente na pista de testes bem como também avaliar a validade da correlação que foi encontrada, executou-se uma série de ensaios DCP *in situ*. Foram necessárias duas pessoas para execução do ensaio *in situ*: uma pessoa para manter o equipamento na posição vertical e aplicar os golpes do martelo e outra para anotar os resultados.

Foram executados ensaios em 13 pontos, afastados 20 metros entre si. Assim, foi feita a avaliação do estado de compactação do material em campo, gerando-se um perfil através de ferramentas computacionais. Os locais de ensaio estão demonstrados na Figura 6 deste capítulo. A Figura 16 apresenta o modo como se executou o ensaio em campo.

Figura 16 - Execução do ensaio DCP *in situ*.



Fonte: Autor, 2015.

3.3. ESTABELECIMENTO DE CORRELAÇÕES E APLICAÇÃO NO CAMPO

A terceira e última etapa constante no método definido para condução desta pesquisa foi baseada em cálculos e validações. Nela foram estabelecidas as correlações, a avaliação do estado de compactação do solo, bem como a validação dos resultados obtidos.

Utilizando os resultados dos ensaios CBR e DCP obtidos na campanha experimental, buscou-se ajustar uma correlação entre os indicativos de suporte fornecidos por meio das duas técnicas. A mesma foi gerada pelos resultados dos ensaios CBR e DCP executados em laboratório. Assim, foi gerada uma tabela relacionando os índices de suporte CBR e as penetrações por golpes (DN) de cada amostra em uma planilha de dados e, assim, gerado um gráfico. Com este gráfico, foi possível, através da planilha de dados, gerar a correlação.

Posteriormente, foi validada a correlação, através de análises comparativas entre a correlação encontrada pela norma americana, citada no capítulo 3, e do coeficiente de determinação (R^2) da correlação alcançada e por meio do ensaio feito na amostra indeformada.

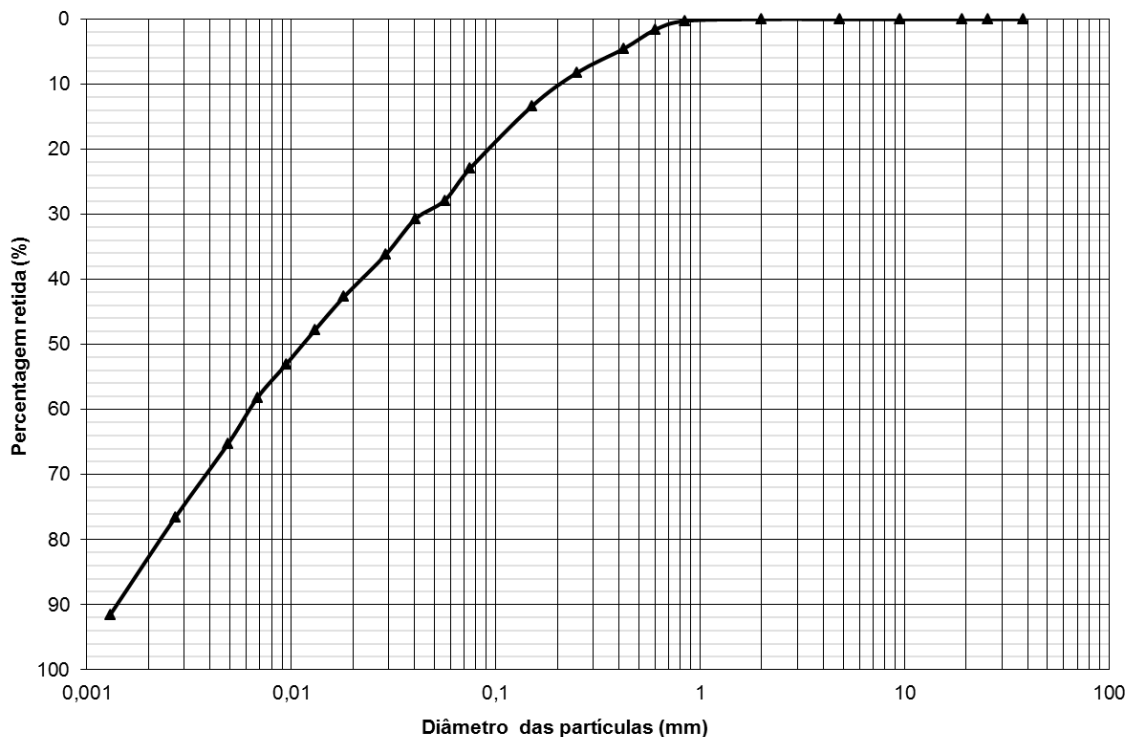
A etapa seguinte do trabalho foi a execução do ensaio DCP em campo no trecho de estudo, descrita no item 4.2.4 deste capítulo. Esta etapa consistiu em aplicar os resultados do ensaio DCP no trecho nas correlações obtidas, e assim, avaliar o valor do CBR correspondente em cada ponto, avaliando se toda a extensão do trecho possui o mesmo nível de compactação e resistência.

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Sabendo, através da literatura técnica, que as correlações entre o CBR e o DCP disponíveis devem ser selecionadas de acordo com as características geotécnicas do solo ensaiado (ASTM, 2009), buscou-se obter as mesmas através de ensaios de caracterização. Os resultados encontrados nos ensaios então dispostos nas tabelas apresentadas abaixo. A Figura 17 apresenta, em forma de gráfico, a distribuição granulométrica do material. As planilhas completas dos ensaios então contidas no Anexo III (Granulometria por Peneiramento e Sedimentação), Anexo IV (Peso Específico Real dos Grãos), Anexo V (Limites de Liquidez e Plasticidade) e Anexo VI (Cálculo do Limite de Liquidez).

Figura 17 - Distribuição Granulométrica do material



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 5 – Composição granulométrica do material.

Argila:	34,75%
Silte:	42,35%
Areia Fina:	14,70%
Areia Média:	3,63%
Areia Grossa:	4,57%
Pedregulho:	0,00%

Fonte: Autor, 2015.

O material tem em sua composição 22,9% de material grosseiro e 77,1% de material fino, sendo que o último é composto por 34,75% de argila e 42,35% de silte. Não houve presença de materiais com diâmetros maiores do que 2 mm, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 6 – Propriedades físicas do solo estudado.

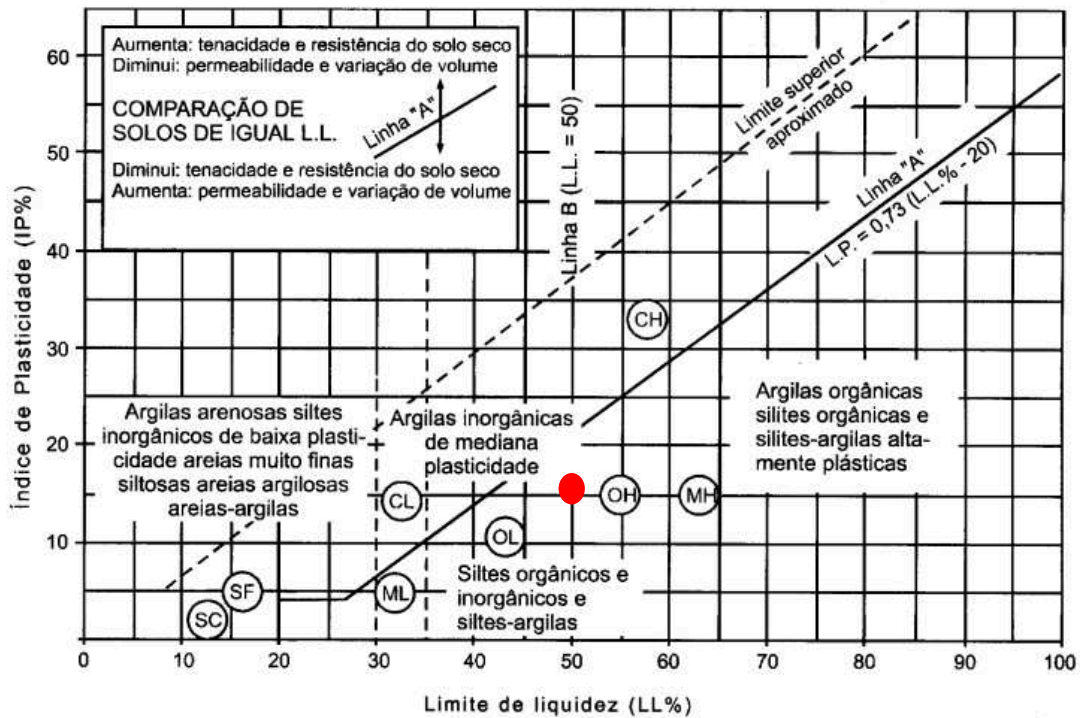
Parâmetro	Valor
γ_s (g/cm ³)	2,796
γ_s (kN/m ³)	27,42
Limite de Liquidez (%)	50,0%
Limite de Plasticidade (%)	34,3%
Índice de Plasticidade (%)	15,7 %

Fonte: Autor, 2015.

Como o Índice de Plasticidade é igual a 15,7%, o solo é classificado como altamente plástico. Através destes dados, é possível também classificar o material por meio de sistemas consagrados de classificação dos solos.

O Sistema Universal de Classificação de Solos (SUCS) (ASTM D2488-84) utiliza o gráfico da Figura 18 para classificação de solos com mais de 50% das partículas passantes na peneira #200. Tal gráfico é chamado de Gráfico de Plasticidade de Casagrande, e tem como variáveis o Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade do material para sua classificação.

Figura 18 - Gráfico de Plasticidade de Casagrande.



Fonte: SENÇO, 2007.

De acordo com o gráfico de Casagrande, o material poderia ser classificado como OH (*organic of high plasticity*) ou material orgânico altamente plástico, OL (*organic of low plasticity*) ou material orgânico com baixa plasticidade e MH (*silt of high plasticity*), traduzido para silte de alta plasticidade. Tendo em vista de que o material não tem características de um material orgânico e apresenta alta plasticidade, pode concluir que o material é classificado como um MH.

Outra classificação existente na literatura é a Classificação HRB, utilizada principalmente em classificações de solos utilizados em pavimentação. Tal classificação, adotada pela AASHTO, utiliza os parâmetros da Tabela 7. O método consiste na eliminação das linhas que não se encaixam com os dados dos ensaios de caracterização executados no material.

Tabela 7 - Classificação HRB.

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)						Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)				
	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6					A-2-7
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa			Solos Siltosos		Solos argilosos ●		
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom						Fraco a pobre				

Fonte: SENÇO, 1929.

O Índice de Grupo (IG) calculado resultou em um valor igual a 12,28. A classificação que se adequa ao material da pista de testes é a A-7. Como $(LL - 30 = 20\%) > (IP=15,7\%)$, o Solo é da classe A-7-5. Esta classificação refere-se a solos argilosos, os quais teriam comportamento fraco a pobre como subleito. Pode-se verificar, analisando o resultado das duas classificações, que as mesmas resultam em tipos diferentes de solos. Tal fato será discutido posteriormente neste trabalho.

4.2. ENSAIOS DE CBR e DCP NO SOLO INDEFORMADO

Na Tabela 8 e Tabela 9, são apresentados o ensaio CBR do solo indeformado e a expansão encontrada após os 4 dias, respectivamente.

Tabela 8 - Ensaio CBR do Solo Indeformado

Tempo (min)	Penetração	Leitura	Leitura (mm)	Pressão (MPa)	CBR 01	CBR 02
0	0	0	0	0,00		
0,5	0,63	5	0,005	0,06		
1	1,27	11	0,011	0,12		
1,5	1,9	16,5	0,0165	0,18		
2	2,54	22,5	0,0225	0,24	3,48	4,44
3	3,81	34	0,034	0,36		
4	5,08	44	0,044	0,46		
6	7,62	60	0,06	0,62	CBR	4,4

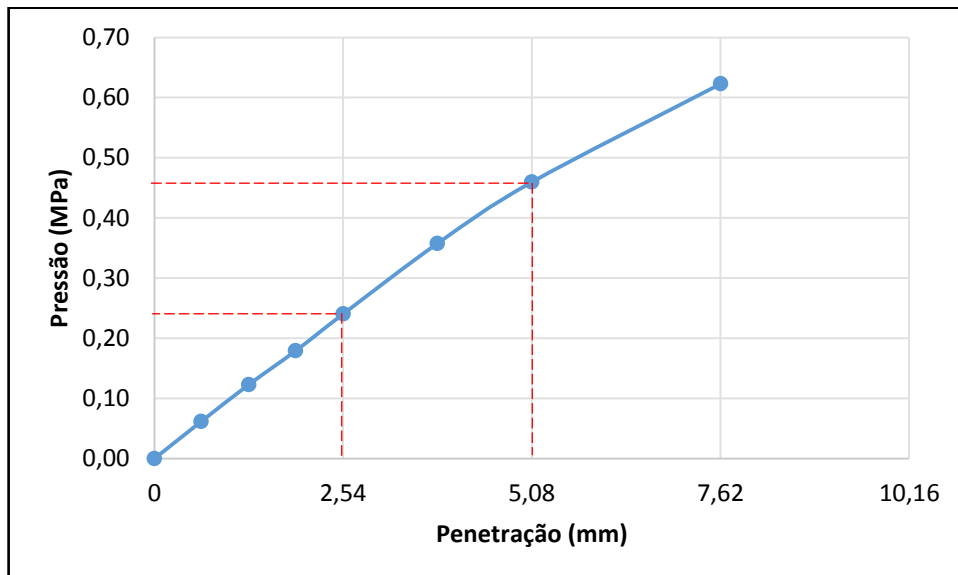
Fonte: Autor, 2015.

Tabela 9 - Expansão do solo indeformado

Leitura Inicial	0
Leitura Final	2
Altura do CP (mm)	114
Expansão (mm)	0,2
Expansão (%)	0,18%

Fonte: Autor, 2015.

A Figura 19 apresenta o gráfico CBR encontrado a partir dos resultados obtidos na Tabela 8, que mostra não ser necessário que se proceda com correção destes valores.

Figura 19 - Gráfico CBR solo indeformado.

Fonte: Autor, 2015.

Após o ensaio CBR executou-se o ensaio DCP no corpo de prova e foi encontrado um DN de 50,50 mm por golpe. Os dados da execução deste ensaio estão apresentados na Tabela 10. Os resultados destes dois ensaios foram, dentre outros, utilizados para validação da correlação.

Tabela 10 - Ensaio DCP - amostra indeformada.

Número de golpes	Valor	Penetração Acumulada (mm)	Penetração entre leituras (mm)	Penetração por golpe (mm/golpe)
0	25	25	25	-
1	85	61	36	61,00
2	125	101	40	50,50
			DN	50,50

Fonte: Autor, 2015.

Quando da coleta da amostra indeformada de solo, a mesma apresentou teor de umidade de 33,24%.

4.3. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO, CBR e DCP EM LABORATÓRIO.

Os dados de ensaios CBR e DCP em solos moldados em laboratório, bem como os resultados dos ensaios de compactação estão dispostos nas Tabelas e Gráficos apresentados a seguir, tanto dos ensaios utilizando energia de compactação Normal, quanto Intermediária, sendo que foram ensaiados cinco corpos de prova para cada energia de compactação.

Tabela 11 - Ensaio de Compactação (PROCTOR) - Energia Normal.

COMPACTAÇÃO					
Cilindro nº	23	12	20	8	17
Umidade (%)	16	19	22,4	25,5	28,7
Dens. Apar. Seca(g/cm ³)	1,511	1,548	1,557	1,52	1,449

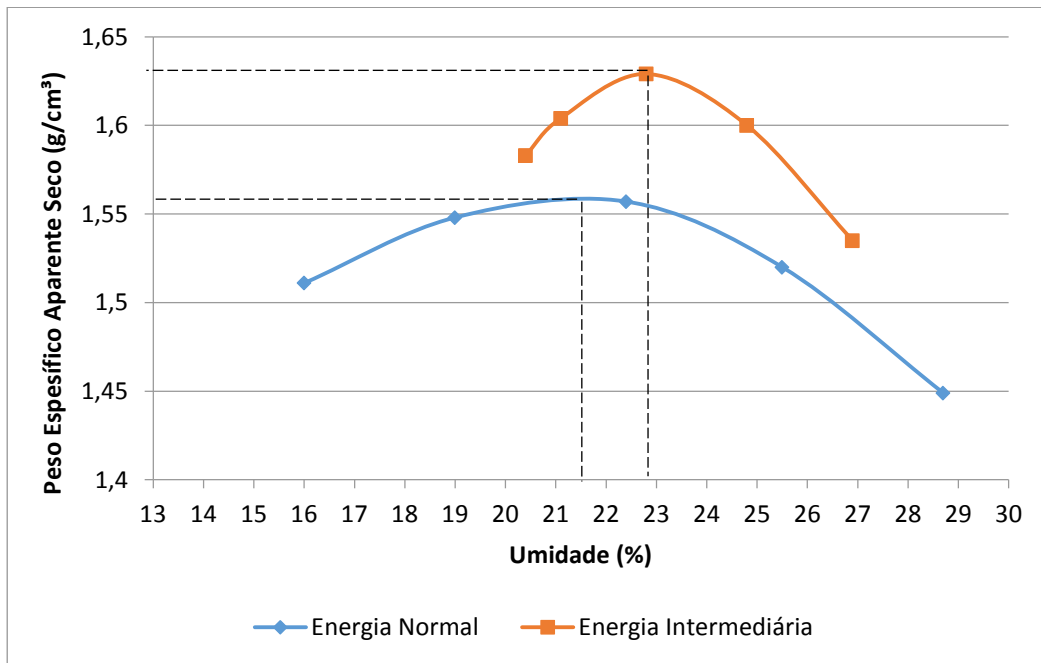
Fonte: Autor, 2015.

Tabela 12 - Ensaio de Compactação (PROCTOR) - Energia Intermediária

COMPACTAÇÃO					
Cilindro nº	23	6	2	3	15
Umidade (%)	20,4	21,1	22,8	24,8	26,9
Dens. Apar. Seca(g/cm ³)	1,583	1,604	1,629	1,6	1,535

Fonte: Autor, 2015.

Figura 20 - Ensaio Proctor das Energias Normal e Intermediária.



Fonte: Autor, 2015.

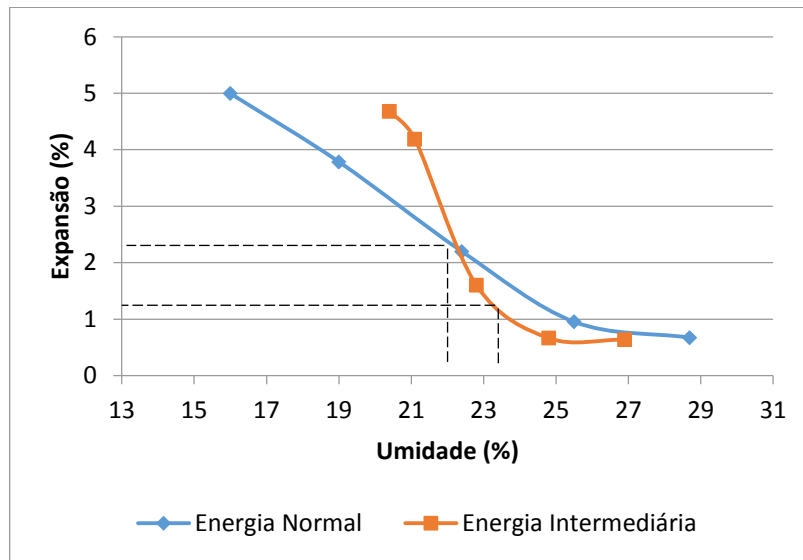
A partir desses resultados, constatou-se que, para energia de compactação normal, o silte-argiloso da pista de testes possui uma densidade máxima de, aproximadamente, 1,559 g/cm³, bem como uma umidade ótima próximo de 21,5%. O comportamento do solo com a mudança de energia de compactação foi muito semelhante, porém, para energia intermediária a umidade ótima é de 22,9% e o peso específico aparente seco máximo é de 1,629 g/cm³.

Tabela 13 - Expansão após 4 dias - Energia Normal e Intermediária.

Cilindro nº	Expansão (%)				
	Umidade (%)	23	12	20	8
Energia Normal	5,00	3,79	2,20	0,96	0,67
Cilindro nº	Expansão (%)				
Umidade (%)	23	6	2	3	15
Energia Intermediária	4,68	4,19	1,60	0,67	0,64

Fonte: Autor, 2015.

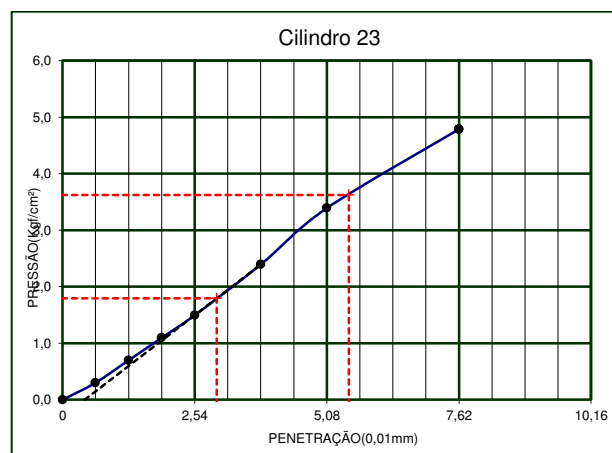
Figura 21 - Expansão - Energia Normal e Intermediária.



Fonte: Autor, 2015

Quanto às expansões, o gráfico demonstra uma queda da mesma com o aumento da umidade da amostra. Em sua umidade ótima, a expansão apresenta valor na ordem de 2,4%. A expansão para energia intermediária em umidade ótima é de 1,65%. Esta diminuição é consequência da densidade máxima, pois o aumento da energia de compactação permite um travamento maior entre as partículas. Com isso, a densidade aumenta e, conseqüentemente, o percentual de vazios diminui, dificultando a entrada de água na estrutura, e por isso, a expansão, que é causada principalmente por conta do preenchimento de água nesses vazios, é reduzida.

Figura 22 - Ensaio CBR - Energia Normal - w=16%.

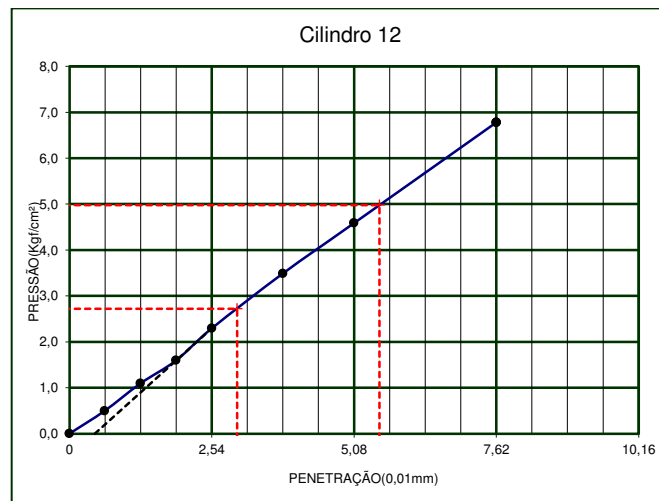


Fonte: Autor, 2015.

Tabela 14 - Ensaio DCP - Energia Normal - w=16%.

Número de golpes	Valor	Penetração Acumulada (mm)	Penetração entre leituras (mm)	Penetração por golpe (mm/golpe)
0	42	42	42	-
1	92	50	8	50,00
2	125	83	33	41,50
-	-	-	DN	41,50

Fonte: Autor, 2015.

Figura 23 - Ensaio CBR - Energia Normal - w=19%.

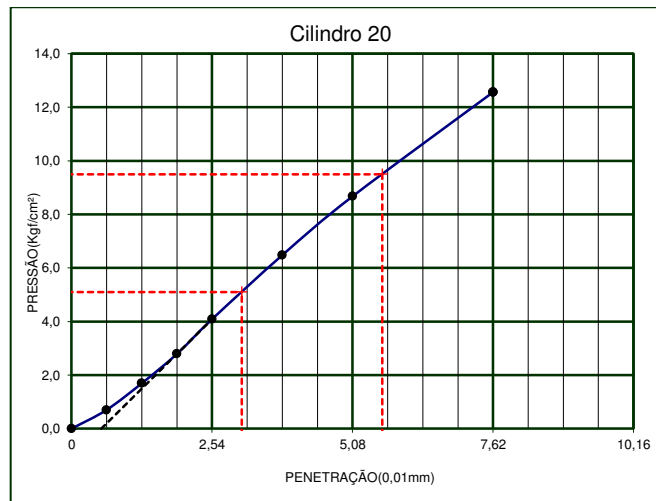
Fonte: Autor, 2015.

Tabela 15 - Ensaio DCP - Energia Normal - w=19%.

Número de golpes	Valor	Penetração Acumulada (mm)	Penetração entre leituras (mm)	Penetração por golpe (mm/golpe)
0	34	34	34	-
1	84	50	16	50,00
2	110	76	26	38,00
-	-	-	DN	38,00

Fonte: Autor, 2015.

Figura 24 - Ensaio CBR - Energia Normal - w=22,4%.



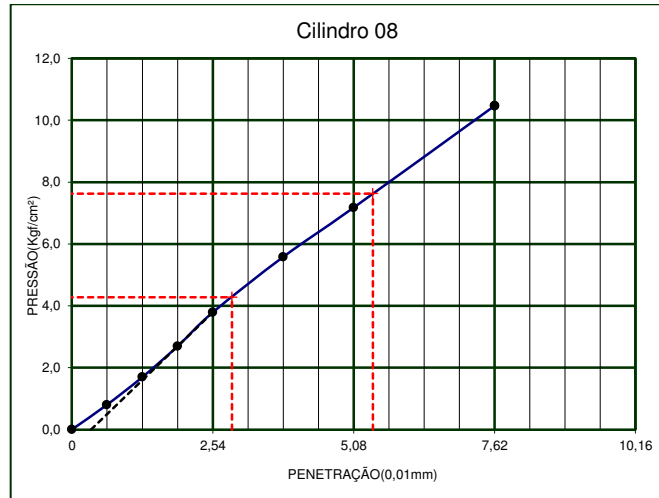
Fonte: Autor, 2015.

Tabela 16 - Ensaio DCP - Energia Normal - w=22,4%.

Número de golpes	Valor	Penetração Acumulada (mm)	Penetração entre leituras (mm)	Penetração por golpe (mm/golpe)
0	26	26	26	-
1	68	42	16	42,00
2	88	62	20	31,00
3	113	87	25	29,00
			DN	29,00

Fonte: Autor, 2015.

Figura 25 - Ensaio CBR - Energia Normal - w=25,5%.



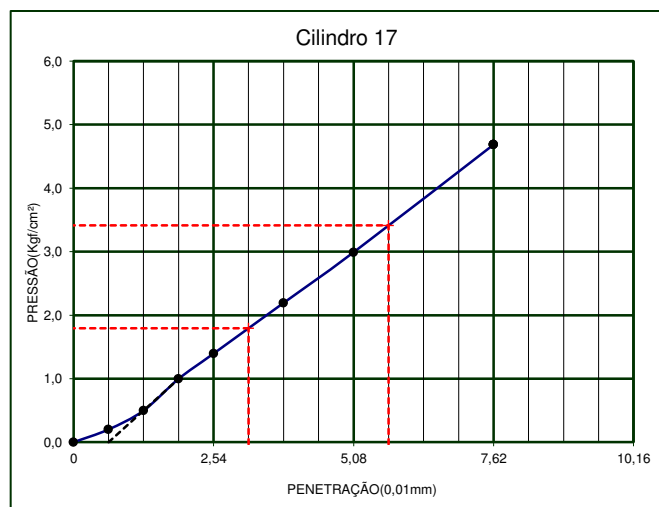
Fonte: Autor, 2015.

Tabela 17 - Ensaio DCP - Energia Normal - w=25,5%

Número de golpes	Valor	Penetração Acumulada (mm)	Penetração entre leituras (mm)	Penetração por golpe (mm/golpe)
0	23	23	23	-
1	66	43	20	43,00
2	100	77	34	38,50
-	-	-	DN	38,50

Fonte: Autor, 2015.

Figura 26 - Ensaio CBR - Energia Normal - w=28,7%.

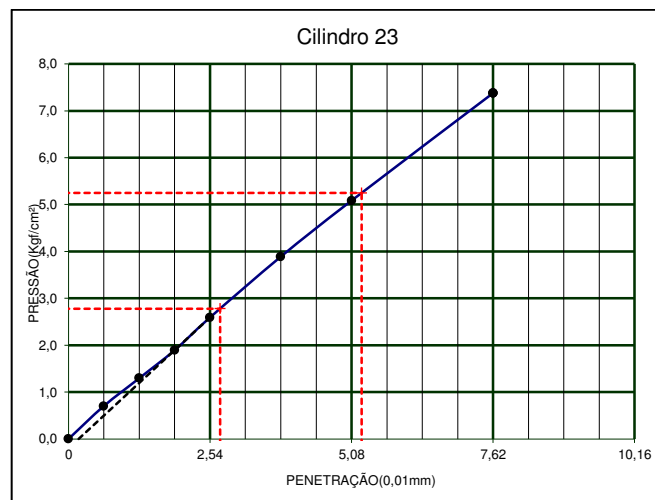


Fonte: Autor, 2015.

Tabela 18 - Ensaio DCP - Energia Normal - w=28,7%.

Número de golpes	Valor	Penetração Acumulada (mm)	Penetração entre leituras (mm)	Penetração por golpe (mm/golpe)
0	28	28	28	-
1	119	91	63	91,00
-	-	-	DN	91,00

Fonte: Autor, 2015.

Figura 27 - Ensaio CBR - Energia Intermediária - w=20,4%.

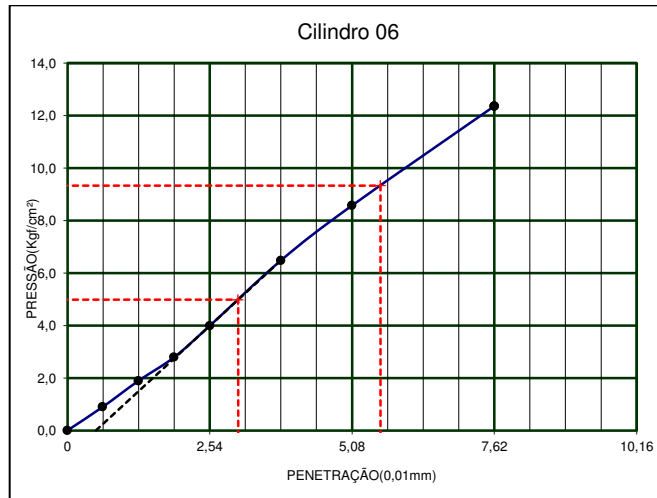
Fonte: Autor, 2015.

Tabela 19 - Ensaio DCP - Energia Intermediária - w= 20,4%.

Número de golpes	Valor	Penetração Acumulada (mm)	Penetração entre leituras (mm)	Penetração por golpe (mm/golpe)
0	24	24	24	-
1	67	43	19	43,00
2	86	62	19	31,00
3	101	77	15	25,67
-	-	-	-	-
-	-	-	DN	25,67

Fonte: Autor, 2015.

Figura 28 - Ensaio CBR - Energia Intermediária - w=21,1%.



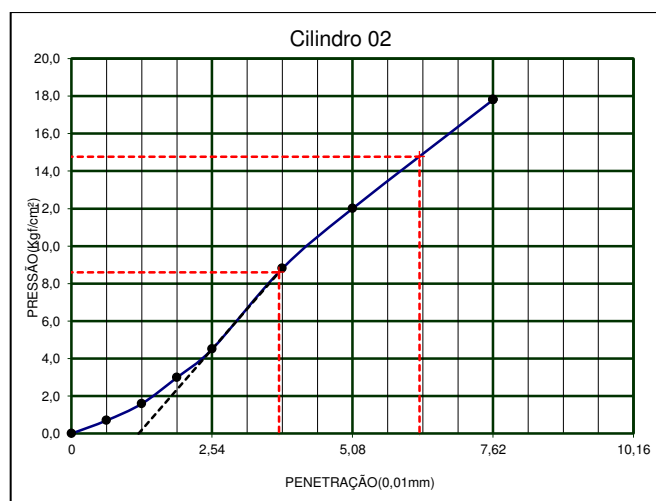
Fonte: Autor, 2015.

Tabela 20 - Ensaio DCP - Energia Intermediária - w= 21,1%.

Número de golpes	Valor	Penetração Acumulada (mm)	Penetração entre leituras (mm)	Penetração por golpe (mm/golpe)
0	38	38	38	-
1	79	41	3	41,00
2	100	62	21	31,00
-	-	-	-	-
-	-	-	DN	31,00

Fonte: Autor, 2015.

Figura 29 - Ensaio CBR - Energia Intermediária - w=22,8%.



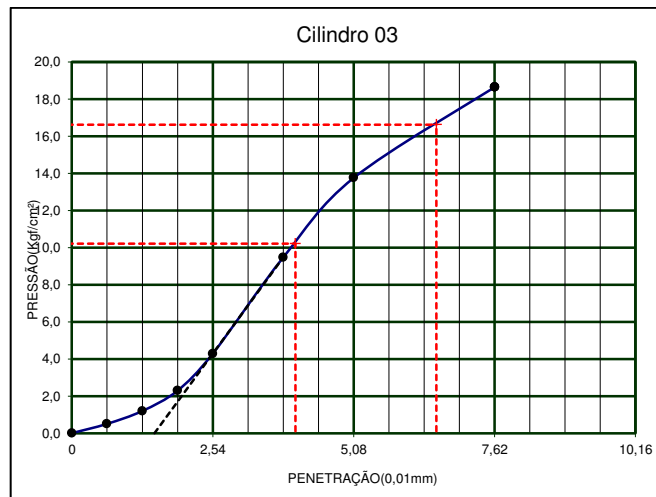
Fonte: Autor, 2015.

Tabela 21 - Ensaio DCP - Energia Intermediária - w= 22,8%.

Número de golpes	Valor	Penetração Acumulada (mm)	Penetração entre leituras (mm)	Penetração por golpe (mm/golpe)
0	24	24	24	-
1	58	34	10	34,00
2	72	48	14	24,00
3	85	61	13	20,33
4	98	74	13	18,50
-	-	-	DN	18,50

Fonte: Autor, 2015.

Figura 30 - Ensaio CBR - Energia Intermediária - w=24,8%.



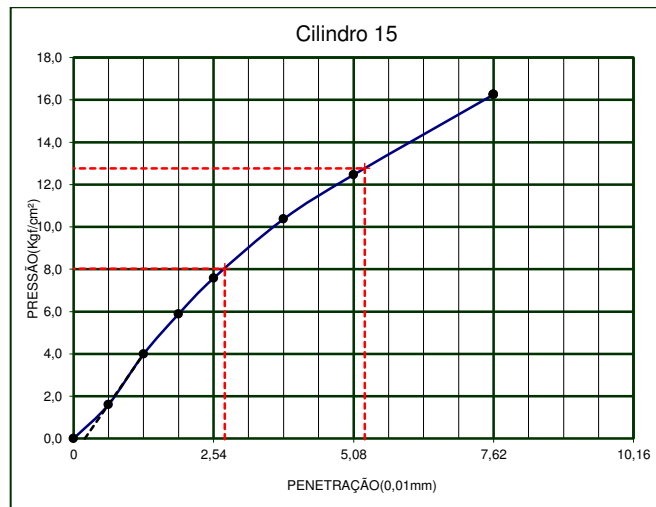
Fonte: Autor, 2015.

Tabela 22 - Ensaio DCP - Energia Intermediária - w= 24,8%.

Número de golpes	Valor	Penetração Acumulada (mm)	Penetração entre leituras (mm)	Penetração por golpe (mm/golpe)
0	21	21	21	-
1	52	31	10	31,00
2	68	47	16	23,50
3	82	61	14	20,33
-	-	-	DN	20,33

Fonte: Autor, 2015.

Figura 31 - Ensaio CBR - Energia Intermediária - w=26,9%.



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 23 - Ensaio DCP - Energia Intermediária - w= 26,9%.

Número de golpes	Valor	Penetração Acumulada (mm)	Penetração entre leituras (mm)	Penetração por golpe (mm/golpe)
0	20	20	20	-
1	57	37	17	37,00
2	80	60	23	30,00
3	101	81	21	27,00
-	-	-	DN	27,00

Fonte: Autor, 2015.

Tabela 24 - Resultados do Ensaio CBR - Energia Normal

PENETRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS					
Cilindro nº	23	12	20	8	17
Teor de umidade (%)	16	19	22,4	25,5	28,7
Índice de suporte Califórnia (%)	3,4	4,7	9,0	7,2	3,2

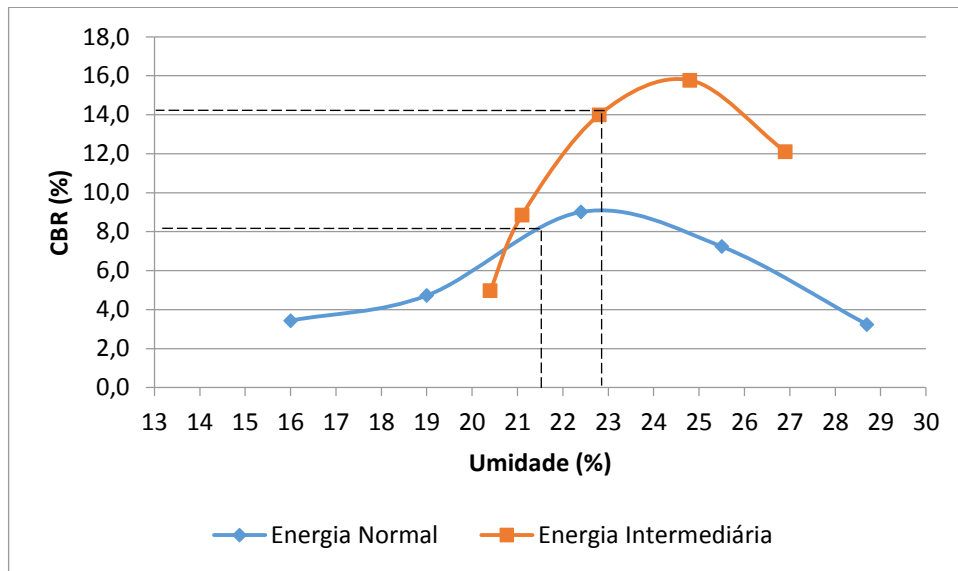
Fonte: Autor, 2015.

Tabela 25 - Resultados Ensaio CBR - Energia Intermediária.

PENETRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS					
Cilindro nº	23	06	02	03	15
Teor de umidade (%)	20,4	21,1	22,8	24,8	26,9
Índice de suporte Califórnia (%)	5,0	8,9	14,0	15,8	12,1

Fonte: Autor, 2015.

Figura 32 - Ensaio CBR - Energias Normal e Intermediária



Fonte: Autor, 2015.

O gráfico de CBR (Figura 32) apresenta, para umidade ótima do material, um CBR na ordem de 8,4% para energia normal de compactação, e 14,1% para energia intermediária. Os pontos formam uma curva semelhante à curva de Proctor, sendo que para energia normal, a curva tem uma leve distorção em seu início.

Se comparado o comportamento das curvas, nota-se que, para um intervalo menor de umidades, o CBR para energia intermediária obteve uma variação maior em relação aos valores obtidos na energia normal. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de a compactação se dar mais por conta da energia transmitida ao corpo de prova do que pela ação lubrificante da água que envolve as partículas de solos.

Pode-se perceber, também, que quando o solo apresenta-se em sua umidade ótima, seus valores de CBR não são máximos. Seus picos, em ambas as energias, de acordo com os resultados, são encontrados com umidades de 1,5% a 2% maiores que a umidade ótima. A NBR 9895/87 não especifica que o material na umidade ótima deve refletir ao CBR máximo do material, porém, estes resultados parecem incomuns e requerem maior investigação.

A Tabela 26 sumariza os resultados dos ensaios de CBR e DCP empregados para o posterior estabelecimento de correlação entre si.

Tabela 26 - Resultados do CBR e DCP de cada corpo de prova

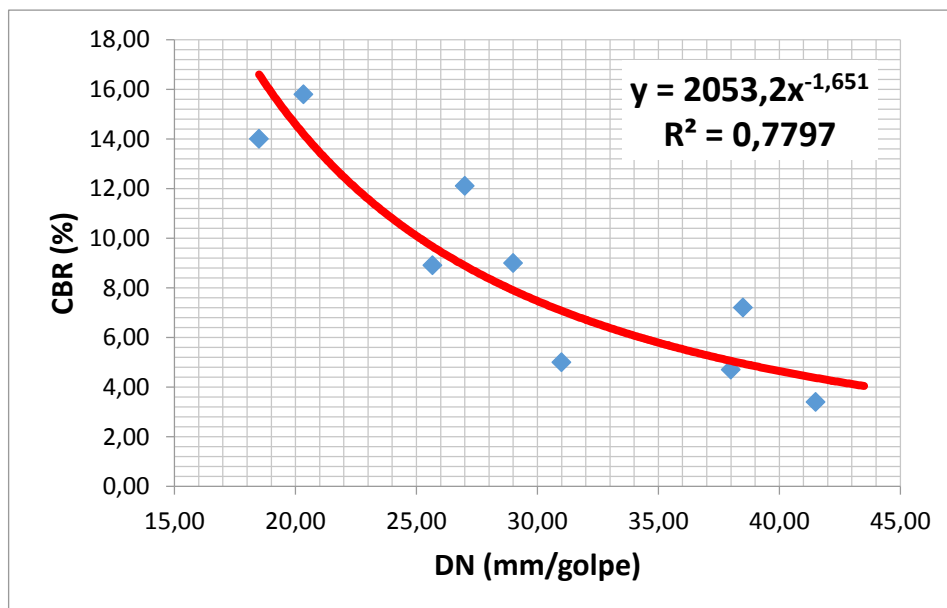
Cilindro	Umidade (%)	Energia de compactação	CBR (%)	DCP (mm/golpe)
23	16,0	Normal	3,40	41,50
12	19,0	Normal	4,70	38,00
20	22,4	Normal	9,00	29,00
8	25,5	Normal	7,20	38,50
17	28,7	Normal	3,2	91,00
23	20,4	Intermediária	5,00	31,00
6	21,1	Intermediária	8,90	25,67
2	22,8	Intermediária	14,00	18,50
3	24,8	Intermediária	15,80	20,33
15	26,9	Intermediária	12,10	27,00

Fonte: Autor, 2015.

4.4. ESTABELECIMENTO DE CORRELAÇÕES ENTRE CBR E DCP.

A partir dos dados da Tabela 26, buscou-se estabelecer uma correlação entre os resultados de ensaios CBR e DCP. Para isto os pontos experimentais foram plotados em um gráfico como mostra a Figura 33.

Figura 33 - Correlação encontrada pelo Autor.



Fonte: Autor, 2015.

Pode-se perceber que os valores de CBR e DCP possuem uma razoável relação de proporcionalidade, tendo, contudo, alguns pontos que não se encaixaram na proporção, como os cilindros 2 e 3, vide dados apresentados na Tabela 27.

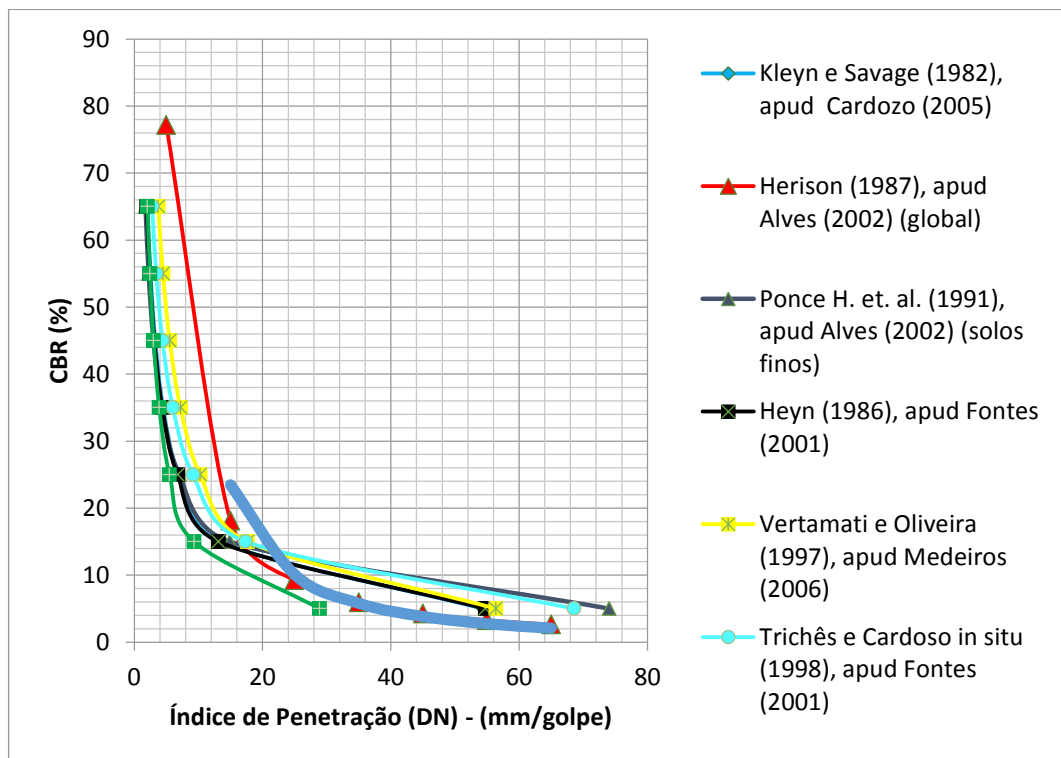
Dentre as possibilidades de modelos matemáticos já implementados no *software* Microsoft Excel, verificou-se que o modelo tipo “potência” foi o que melhor se ajustou aos pontos experimentais. A equação correspondente ao modelo indicado no gráfico tem R^2 da ordem de 0,78, e é mostrada a seguir:

$$CBR = 2053,2 \cdot DCP^{(-1,651)}$$

A equação, a qual se apresenta na forma de potência, demonstra que, quanto maior o CBR do material, menor é o valor de DN. Vale ressaltar, que, como o ponto que possui 91 mm/golpe e com CBR correspondente a 3,2% está distante dos outros pontos, este foi descartado para geração da correlação. Para utilizá-lo, seria preciso preencher, com resultados, esse intervalo vazio.

Na Figura 34 a correlação obtida neste trabalho é comparada com outras propostas constantes na literatura e já mencionadas no Capítulo 2 deste trabalho.

Figura 34 - Comparativo entre comportamentos das correções.



Fonte: Autor, 2015.

No trecho de variação de CBR entre 0 e 20 há considerável semelhança entre as curvas mostradas e a obtida neste trabalho. Tal comportamento é importante porque valida com base em outras correlações justamente a faixa de CBR obtida e utilizada para geração da correção deste trabalho. As amostras abrangeram CBR entre 3,4% a 15,8% e, por isso, tem-se aqui um intervalo com maior confiabilidade.

É possível verificar também que a correlação de Herison (1987), mesmo sendo uma curva proveniente de uma equação logarítmica, se comporta, para CBR menores que 20%, praticamente da mesma forma que a correlação deste trabalho.

Concluída a fase de geração da correlação, foi necessário avaliar a validade da mesma para a situação da Pista de Testes estudada neste trabalho. Tal validação foi feita a partir dos resultados apresentados nos ensaios de CBR e DCP da amostra indeformada. Através do resultado de DCP medido em laboratório, um valor de CBR igual a 3,2 foi obtido, enquanto um CBR igual a 4,4 foi efetivamente medido.

Um ensaio de DCP foi efetuado em campo junto à área em que fora coletada a amostra indeformada deste trabalho. Por meio da correlação com DCP estabelecida neste trabalho o valor de CBR estimado para este local é de aproximadamente 5.

Assim, verifica-se que a correlação construída subestima os valores de CBR quando aplicada a amostras indeformadas contidas em cilindros. Por outro lado, quando aplicada em campo tende a apresentar valores levemente maiores que aqueles que seriam provavelmente medidos em laboratório. Estes resultados ilustram que, apesar do reduzido número de pontos experimentais utilizados, pode-se perceber um fator de influência campo-laboratório nestes resultados. Esta questão, no entanto, requer maior investigação no futuro.

A correlação também foi utilizada para avaliar o estado de compactação ao longo da pista de testes, conforme mostrado na seção posterior.

4.5. ENSAIOS DE DCP EM CAMPO

A Tabela 28 apresenta os resultados dos ensaios DCP *in situ* na pista de testes sob a forma do valor DN para os 20 centímetros mais superficiais do terreno.

Ela também apresenta os CBR encontrados utilizando a correlação encontrada neste trabalho e as correlações fornecidas pela Norma ASTM D6951-09.

De acordo com a referida norma, as correlações são dependentes da natureza do solo, havendo correlações definidas em função da textura e plasticidade dos mesmos. Tendo em vista que, de acordo com a classificação SUCS, o solo utilizado é um silte altamente plástico, utilizou-se a correlação mais generalista proposta pela ASTM D6951-09, que se aplica a todos os tipos de solo, exceto para argilas com alta plasticidade, e para argilas com baixa plasticidade com CBR<10%, a título de comparação do desempenho da correlação aqui estabelecida. Tal equação apresentou um comportamento muito semelhante ao da correlação encontrada por este trabalho. Porém, como para classificação HBR o solo da pista de testes é considerado argiloso e com alta plasticidade (IP = 15,7%), também para efeito de comparação, apresentaram-se valores de CBR encontrados utilizando a correlação para argilas altamente plásticas, fornecida pela norma DCP. Pôde-se verificar que há considerável diferença entre os resultados dos mesmos.

Tabela 27 - Comparação das correlações do Autor e da Norma DCP da ASTM

Distancia do Marco Topográfico (m)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
	DN encontrado com correlações												
DN pista (mm/golpe)	37,6	35	42	50,6	69	53	46	58	42	38	45	68	76
CBR Correlação Autor (%)	5,1	5,8	4,3	3,2	1,9	2,9	3,7	2,5	4,3	5,1	3,8	1,9	1,6
CBR Correlação norma 1* (%)	5,0	5,4	4,4	3,6	2,5	3,4	4,0	3,1	4,4	5,0	4,1	2,6	2,3
CBR Correlação norma 2** (%)	9,3	10,0	8,3	6,9	5,0	6,6	7,6	6,0	8,3	9,2	7,7	5,1	4,6
* - Correlação norma ASTM D6951-09 para todos os tipos de solo exceto para argilas com baixa plasticidade com CBR<10% e argilas altamente plásticas. ** - Correlação norma ASTM D6951-09 para argilas altamente plásticas.													

Fonte: Autor, 2015.

Nota-se que, comparando as correlações do autor e para argilas altamente plásticas (correlação 2 da norma), fornecida pela norma, os resultados não se aproximam. Porém, os resultados encontrados entre a correlação deste trabalho e a correlação 1 da norma, também fornecida pela norma da ASTM são muito próximos, possuindo diferenças inferiores a 0,7 apenas (em termos de CBR) em todos os pontos.

Porém, a discussão que se traz com esses comparativos são as causas e consequências destas classificações (SUCS e HRB) não apontarem o mesmo resultado, ou tipo de solo. Assim, quando a classificação do solo é determinante para a interpretação de resultados, podem-se ter avaliações incoerentes. Nesse sentido, Cozzolino e Nogami (1993) questionam a validade de sistemas de classificação norte-americanos, onde o clima é tipicamente temperado, para solos formados em clima tropical e subtropical. Segundo esses autores, classificar um solo de clima tropical da mesma forma que um solo de clima temperado leva frequentemente a resultados não condizentes com a realidade.

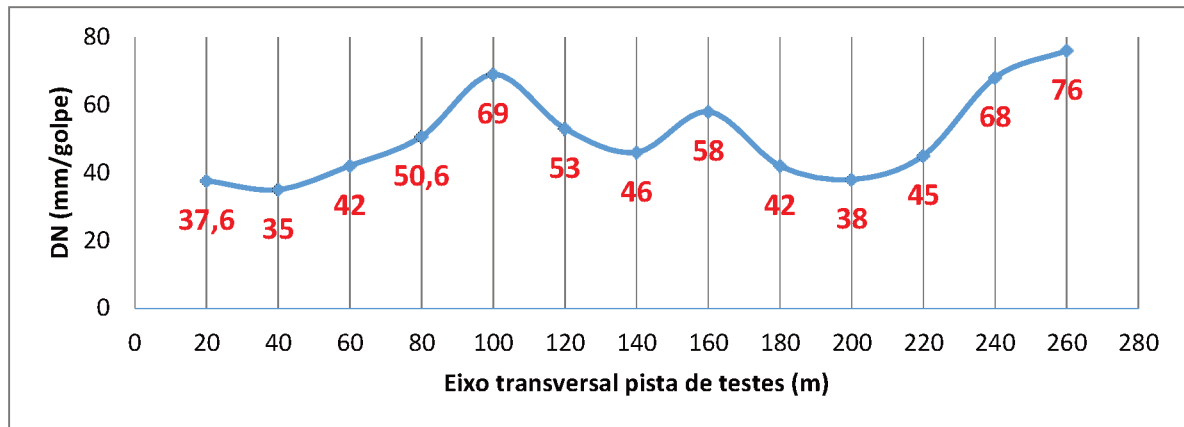
Cozzolino e Nogami (1993) citam que em solos tropicais e subtropicais a execução do ensaio de granulometria utilizando defloculante e a dispersão da amostra, por exemplo, levam a obtenção de teores de argila que não refletem a forma com que o solo ocorre naturalmente. Em campo as partículas medidas no ensaio como sendo argilas, podem ocorrer sob a forma de grumos, que assumem o tamanho de partículas maiores. Heidemann (2015) cita ainda que cristais muito alterados de feldspatos ou micas podem ser destruídos na fase de dispersão e manuseio do solo, revelando um percentual de finos maior do que realmente ocorre em campo. Tal problemática incide também sobre os resultados dos limites de consistência. Como tais sistemas de classificação (SUCS e HRB) baseiam-se fundamentalmente em informações granulométricas e de limites de consistência, acredita-se que os resultados dos mesmos, quando aplicados à solos formados em ambientes tropicais e subtropicais não devem ser tomados como definitivos, mas tão somente como uma informação complementar.

Por isso, mesmo que o material tenha sido classificado pela classificação HRB como um solo argilo-siltoso, pode ter comportamento que reflita um solo pouco mais grosseiro como um silte argiloso.

Através dos resultados dos ensaios foi possível elaborar perfis de resistência da pista de testes utilizando as três correlações, a fim de comparar o grau de

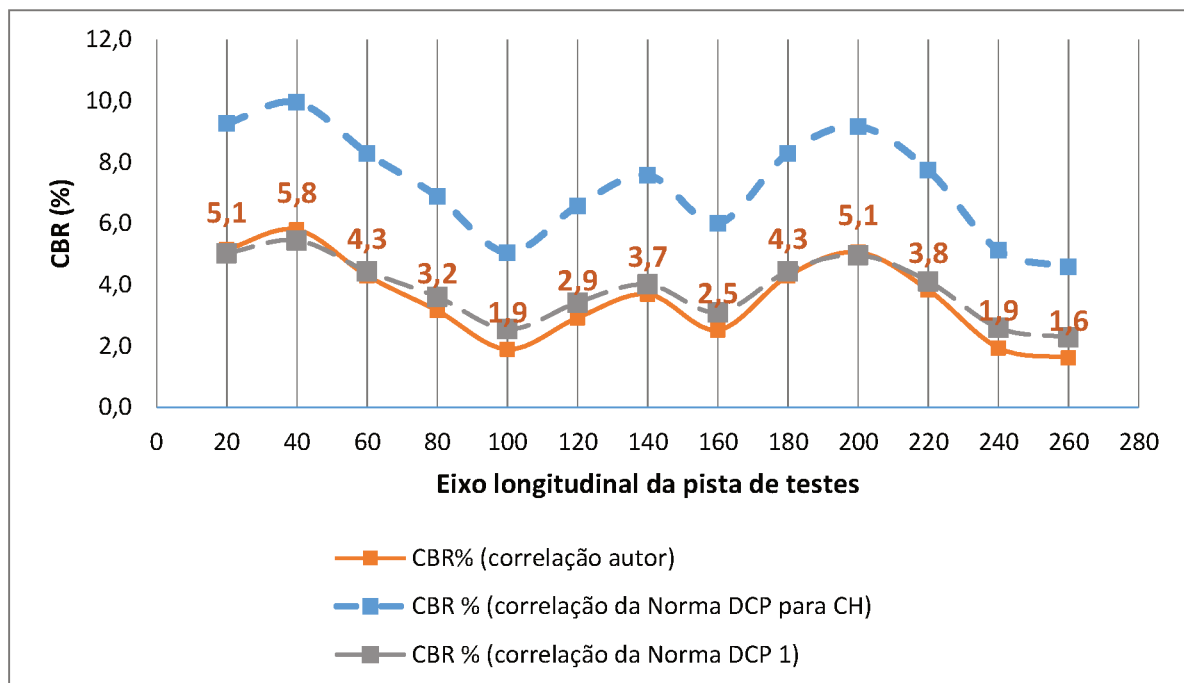
semelhança delas. A Figura 35 apresenta o perfil feito a partir dos resultados do ensaio DCP. Já a Figura 36 apresenta os perfis de CBR encontrados a partir das correlações.

Figura 35 - Perfil de Resistencia da Pista de Testes através dos ensaios DCP *in situ*.



Fonte: Autor, 2015.

Figura 36 - Perfil de Resistência da Pista de Testes utilizando correlação encontrada e comparação da mesma com correlações fornecida pela Norma DCP da ASTM.



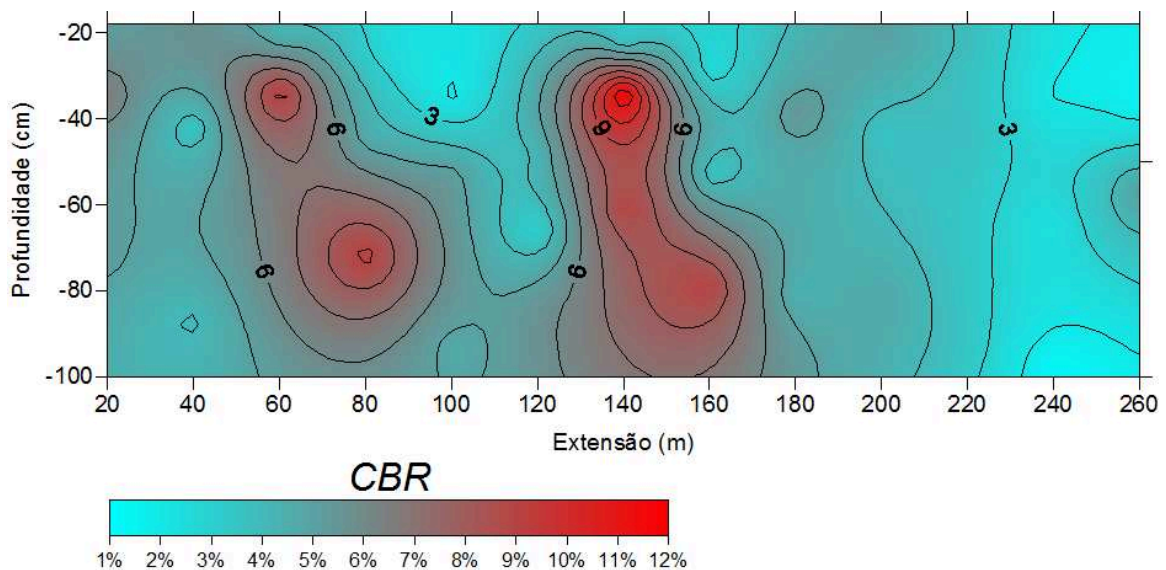
Fonte: Autor, 2015.

Confirmando o que foi mencionado anteriormente, a Figura 36 demonstra que o comportamento da correlação 1 da norma e a encontrada neste trabalho é semelhante. Os pontos os quais os valores apresentam seus picos são os mesmos,

e crescem e descessem da mesma forma, com ângulos muito parecidos. Contudo, a correlação 2 da norma não se aproxima dos resultados obtidos e aponta para valores bastante superiores aos obtidos por meio da correlação gerada neste trabalho. Esta mesma correlação não indicaria resultados satisfatórios se aplicada aos resultados dos ensaios de laboratório em amostra indeformada. Com um $DN=50,5$ a correlação 2 indicaria um CBR da ordem de 7, muito superior aos 4,4 medidos efetivamente.

Como o ensaio DCP executado neste trabalho abrangeu profundidades de até um metro, pôde-se, então, verificar se havia homogeneidade na compactação, não apenas na camada imediatamente próxima da superfície, mas também ao longo de sua profundidade. A Figura 37 apresenta os resultados de CBR, encontrados a partir da correlação, em função de sua profundidade e extensão. A Figura 38 e Figura 39 apresentam os perfis encontrados através das correlações fornecidas pela norma.

Figura 37 - Perfil de CBR obtido por meio da correlação estabelecida neste trabalho.



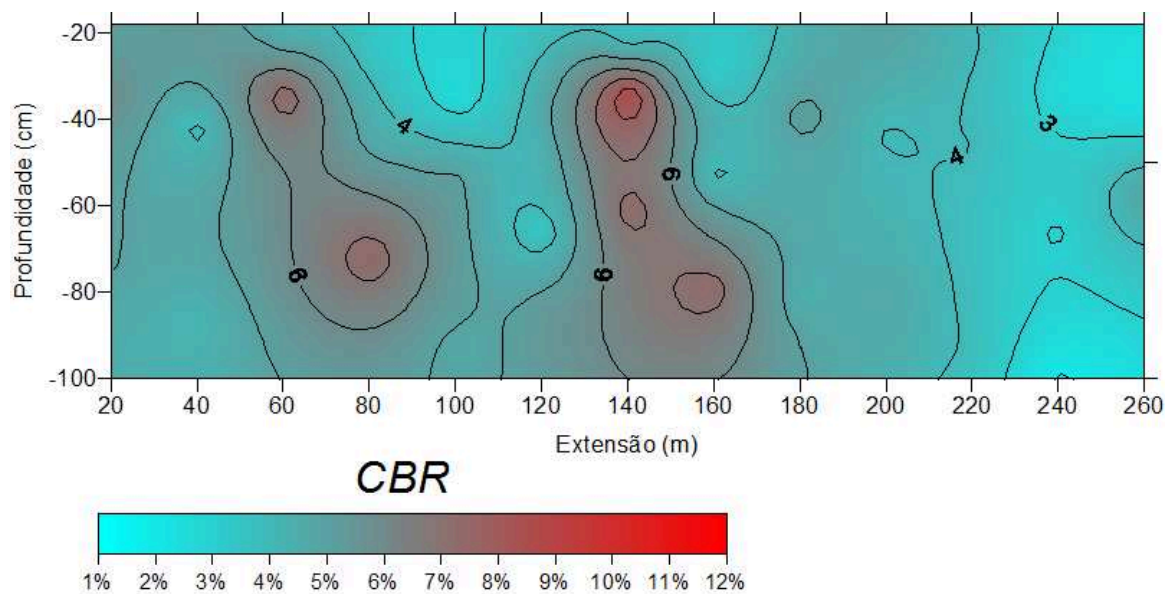
Fonte: Autor, 2015.

Através deste gráfico é possível verificar que a compactação do aterro não é homogênea. Entre 20 e 190 metros de distância do marco geográfico, há uma predominância de solos apresentando CBR entre 5 e 10%, tendo, porém, CBR inferiores a 5% em sua superfície. Também nesse intervalo, a 140 metros do marco, há a presença de um solo com CBR entre 10 e 12%. Tal fato pode ter como justificativa a presença de um solo com características diferentes neste local, ou o

mesmo solo, mas tendo sofrido compactação mais intensa. Isto poderia ocorrer se o sentido do processo de compactação não fosse longitudinal, mas transversal à extensão da pista, gerando zonas de maior compactação e que nesta figura são vistas como aproximadamente pontuais.

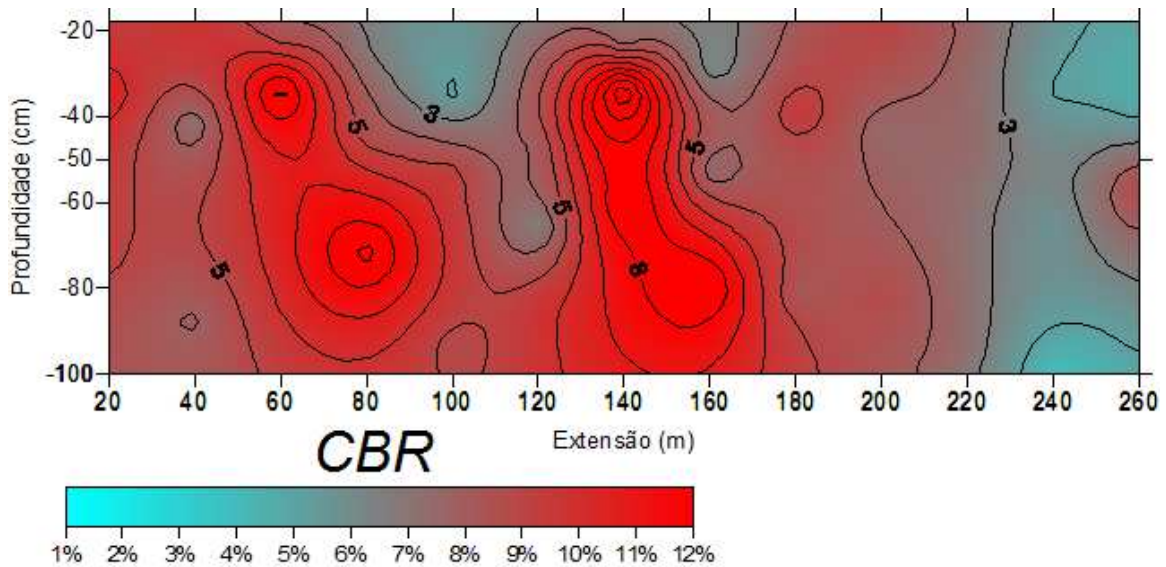
A partir de 190 metros do marco, o solo apresenta baixos valores de CBR, entre 1 e 5%. Ou seja, entre 190 e 250 metros do marco, a compactação do solo é menor do que ao restante do trecho analisado.

Figura 38 - Perfil de CBR obtido por meio da “correlação norma 1” da ASTM D6951-09.



Fonte: Autor, 2015.

Figura 39 - Perfil de CBR obtido por meio da “correlação norma 2” da ASTM D6951-09.



Fonte: Autor, 2015.

Nota-se, pelos gráficos, que a correlação da norma 1 apresenta resultados semelhantes ao da correlação deste trabalho, porém com seus valores mais baixos em relação a mesma. Já o gráfico para correlação da norma 2 os valores são muito superiores ao da correlação deste trabalho, apresentando CBR acima de 5% na maioria do trecho estudado.

Porém, comparando os três gráficos, é possível verificar que os picos de altos e baixos CBR, nos três gráficos, estão nos mesmos locais do trecho, confirmando que, de fato, a relação de resultados entre os ensaios CBR e DCP é verdadeira.

5. CONCLUSÃO

As classificações SUCS e HRB não apresentaram resultados iguais sobre o tipo solo da pista de testes. Tal fato leva a resultados inconclusivos sobre a natureza do material. Isso incentiva a discussão sobre os sistemas de classificações de solo norte-americanos utilizados no Brasil, que por conta dos climas distintos, dentre outras causas, levam a avaliações errôneas sobre a real classificação dos materiais, conforme discutido por Cozzolino e Nogami (1993) e Heidemann (2015). Como sugestão, Cozzolino e Nogami (1993) apresentam o sistema de classificação MCT, o qual refere-se à classificação para solos de clima tropical, predominante no Brasil.

Porém, após análise do comparativo entre as correlações da norma e a alcançada neste trabalho, conclui-se que este solo apresenta características que se aproximam mais de um solo siltoso do que um solo argiloso. Isso se deve pela grande divergência de comportamento entre a correlação 2 (para argilas altamente plásticas) da norma ASTM D6951-09 e a correlação encontrada neste trabalho enquanto há considerável semelhança de comportamento entre a correlação 1 (para a maioria dos solos) da norma ASTM D6951-09 e a correlação do autor.

Os ensaios de compactação Proctor executados na energia normal e intermediária apresentaram resultados questionáveis. A densidade seca máxima do material compactado com energia normal se mostrou menor do que o compactado com energia de compactação intermediária, ao passo que a umidade ótima aplicando energia intermediária de compactação foi maior em relação à umidade ótima do material compactado com energia normal, sendo este comportamento incomum. Tal fato pode ter sido conta de uma alteração física do material entre as energias de compactação. Além disso, na fase de homogeneização da amostra, grumos formados poderiam distorcer os resultados da umidade da amostra. Ressalva-se que tal comportamento não influenciou nos resultados de CBR e DCP utilizados para o desenvolvimento da correlação.

Os resultados dos ensaios CBR se comportaram da mesma forma que os resultados do Proctor. O índice de suporte máximo para corpos de prova compactados com energia intermediária apresentou valor superior ao índice máximo obtido nos corpos de prova moldados com energia normal de compactação. A justificativa desse fato é a mesma dos resultados do ensaio Proctor, visto que o CBR é diretamente relacionado ao estado de compactação do material no momento.

Normalmente, quando compactado sob umidade ótima os solos apresentam os valores máximos de CBR, mas não fora isso o que ocorre com o material da pista de teste, onde os CBR máximos, obtidos pelas duas energias de compactação, foram medidos em corpos de prova sob umidades de 1,5% a 2% maiores que a umidade ótima. Tal comportamento merece um estudo mais aprofundado.

Através dos resultados de DCP correspondentes a cada corpo de prova de CBR, conclui-se que há relação entre esses dois ensaios, sendo ela inversamente proporcional. A equação em forma de “potência” apresentou um R^2 na ordem de 0,78, um dos fatores que validam a correlação alcançada neste trabalho.

As outras maneiras que este trabalho encontrou para validar a correlação entre os ensaios CBR e DCP também apresentaram resultados satisfatórios. Utilizando a correlação alcançada neste trabalho no corpo de prova indeformado no cilindro de CBR, alcançou-se uma diferença de 1,2% do índice de suporte obtido pelo ensaio CBR na amostra indeformada, que, em parâmetros de CBR, é considerável baixa. Além disso, Aplicando a correlação no DN encontrado no local de coleta da amostra indeformada, essa diferença cai para 0,7%. Portanto, a relação campo-laboratório da correlação é consideravelmente boa.

Também para efeito de validação, comparando o comportamento da correlação alcançada neste trabalho com correlações advindas de outros autores mencionados neste trabalho, nota-se que há considerável semelhança entre elas, principalmente na faixa de CBR que a correlação deste trabalho abrange. Isto serve como indicativo de que a correlação entre o DCP e CBR é relevante e merece que se façam estudos mais aprofundados sobre a mesma, como estudos do comportamento do CBR com a variação da energia de compactação, umidade e material.

Em se tratando dos gráficos que relacionam CBR em função da extensão e profundidade da pista, os mesmos se mostraram como uma interessante ferramenta para avaliação do estado de compactação de solos. A avaliação utilizando esses gráficos propiciou maior facilidade e abrangência para identificação de zonas de baixos e elevados CBR. Com ele, pode-se concluir que há heterogeneidade quanto a compactação da camada de subleito da pista de testes, podendo, assim, configurar um problema para fins de execução de camadas de pavimentação asfáltica no mesmo.

Assim, pode-se dizer que essa correlação viabiliza um maior controle de compactação de grandes áreas, diminuindo fatores que venham a serem influentes em problemas de pavimentação asfáltica, por exemplo. Assim, é possível, também, identificar casos isolados presentes em grandes áreas que merecem uma atenção maior no momento da execução.

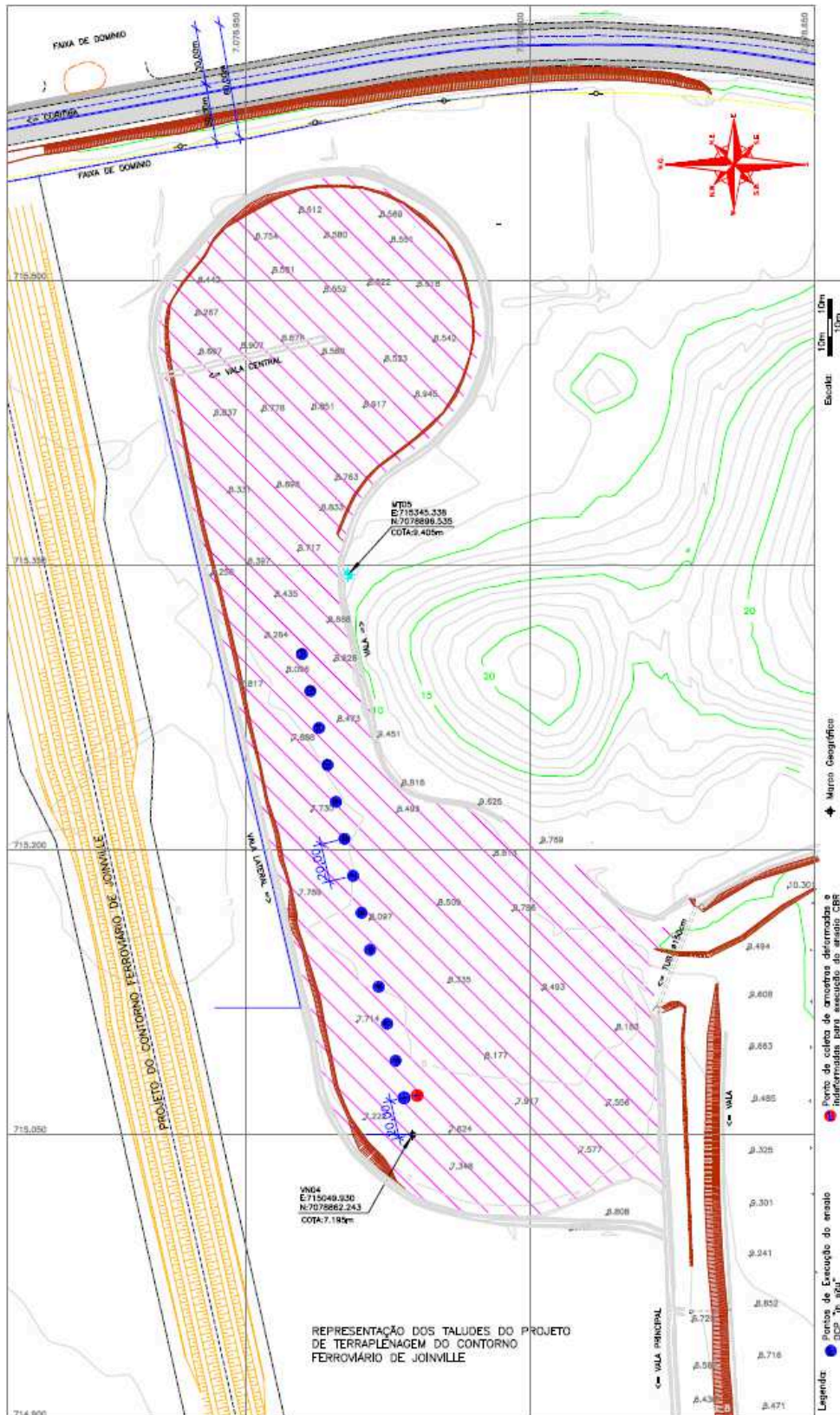
Através do que foi abordado neste trabalho, conclui-se que a técnica de avaliação da capacidade de suporte e do estado de compactação dos solos utilizado no Brasil, o CBR, mesmo apresentando resultados satisfatórios com relação ao estado de compactação *in situ* do material, e com suas mais de oito décadas sendo, em âmbito mundial, o mais utilizado, este possui um procedimento demorado e passível de erros, tanto na coleta, quanto em sua execução.

Por isso, o CBR é passível de melhorias que podem ser feitas mediante auxílio de outras técnicas, como o ensaio DCP, onde apresenta uma execução simples e expedita. Tal ensaio se torna uma boa alternativa para auxiliar o CBR para análise do estado de compactação de solos, principalmente, em grandes áreas como em obras de pavimentação asfáltica. Porém, para que se use esta técnica no país, é necessário torná-la conhecida e normalizá-la nacionalmente, pois a mesma possui apenas normas norte-americanas.

Por isso, este trabalho também procurou, além de difundir o ensaio DCP no Brasil, incentivar o estudo desta técnica de modo a facilitar e potencializar os estudos de solo, para que problemas de engenharia não sejam causados por negligências na avaliação das reais características e condições do material utilizado.

Por fim, ressalva-se que a correlação entre os ensaios CBR e DCP é empírica, baseada em experiências, visto que as medidas necessárias para encontrar a capacidade de suporte dos solos se diferem uma da outra, como a forma de aplicação da carga, a área carregada, a profundidade abrangida pelo ensaio e as grandezas medidas.

ANEXO I – Projeto Geométrico da Pista de Testes da UFSC – Joinville.



Fonte: UFSC, 2015.

ANEXO II – Relação CBR versus Profundidade em função da extensão da Pista de Testes.

Extensão (m)	Profundidade (cm)	CBR (%) - Correlação Autor	CBR (%) - Correlação Norma 1*	CBR (%) - Correlação Norma 2**
20	19	5,1	5,0	9,3
20	35	6,6	5,9	10,8
20	73	5,2	5,0	9,3
40	18	5,8	5,4	10,0
40	42	3,3	3,8	7,1
40	87	3,9	4,2	7,8
60	21	4,3	4,4	8,3
60	34	9,5	7,6	13,4
60	67	6,6	5,9	10,7
80	26	3,2	3,6	6,9
80	45	4,6	4,7	8,7
80	72	9,4	7,5	13,3
100	35	1,9	2,5	5,0
100	53	5,3	5,1	9,4
100	93	4,6	4,7	8,7
120	66	2,9	3,4	6,6
120	48	4,1	4,3	8,1
120	84	5,7	5,4	9,8
140	23	3,7	4,0	7,6
140	34	12,1	9,0	15,5
140	61	9,0	7,3	13,0
160	29	2,5	3,1	6,0
160	53	3,5	3,9	7,3
160	79	9,1	7,4	13,0
180	21	4,3	4,4	8,3
180	39	5,5	5,3	9,7
180	81	4,3	4,4	8,3
200	19	5,1	5,0	9,2
200	43	3,6	3,9	7,4
200	82	4,7	4,8	8,8
220	22	3,8	4,1	7,7
220	46	3,7	4,0	7,6
220	93	3,5	3,9	7,3
240	34	1,9	2,6	5,1
240	65	2,3	2,9	5,7
240	100	1,2	1,9	3,9
260	38	1,6	2,3	4,6
260	57	5,1	5,0	9,2
260	99	1,8	2,5	5,0

* - Correlação norma ASTM D6951-09 para todos os tipos de solo exceto para argilas com baixa plasticidade com CBR<10% e argilas altamente plásticas.

** - Correlação norma ASTM D6951-09 para argilas altamente plásticas.

Fonte: Autor, 2015.

ANEXO III – Ensaios de Granulometria e Sedimentação.

UFRGS - Laboratório de Mecânica dos Solos									
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE SOLOS									
Amostra:		Solo seco, com defloculante 26/08/2015				UMIDADE			
		Proveta 02- com defloculante: a = -185x + 201.83 (1 ^{as} três leituras) a' = -184.15x + 200.12 (demais leituras) Densímetro 5842/05 - com defloculante: y = -5E-06x ² - 0.00002x + 1,0061				W _{c+s+w} (gf)	92,64	99,93	
						W _{c+s} (gf):	83,37	90,85	
						W _c (gf):	24,48	32,46	
						w (%)	15,74	15,55	
						W _{média} (%)	15,65		
SEDIMENTAÇÃO									
P. Espec. R. dos Grãos (g/cm ³):		2,796		Peso úmido (gf):		80,25		Peso seco (gf):	69,39
Tempo Decorrido		Temperatura (°C)	Viscosidade (g.s/cm ²)	Densidade L	Correção L _d	Altura Queda (cm)	Diâmetro (mm)	(%) < Diâmetro	
30	s	25,5	9,0362E-06	1,0345	1,00234	10,45	0,0562	72,15	
1	min	25,5	9,0362E-06	1,0332	1,00234	10,69	0,0402	69,24	
2	min	25,5	9,0362E-06	1,0308	1,00234	11,13	0,029	63,85	
5	min	25,5	9,0362E-06	1,0279	1,00234	10,83	0,0181	57,34	
10	min	25,5	9,0362E-06	1,0256	1,00234	11,26	0,013	52,18	
20	min	25,3	9,0769E-06	1,0233	1,00239	11,68	0,0094	46,91	
40	min	25	9,1385E-06	1,0211	1,00248	12,08	0,0068	41,77	
80	min	24,5	9,2427E-06	1,0181	1,00261	12,64	0,0049	34,75	
286	min	23,1	9,5444E-06	1,0134	1,00297	13,5	0,0027	23,4	
1440	min	22,5	9,6785E-06	1,0069	1,00312	14,7	0,0013	8,48	
PENEIRAMENTO									
W _t #10 (gf):		80,25		W _t #4 (gf):		80,25			
W _s #10 (gf):		69,39		W _s #4 (gf):		69,39			
Peneiras		Mat. Retido (gf)	Material que passa (gf)		Passante (%)				
Nº	mm		Parcial	Total					
	38,1					100			
	25,4					100			
	3/4"					100			
	3/8"					100			
	4					100			
	10					100			
	20	0,84	0,19	69,2		99,73			
	30	0,6	0,94	68,26		98,37			
	40	0,42	2,04	66,22		95,43			
	60	0,25	2,52	63,7		91,8			
	100	0,15	3,59	60,11		86,63			
	200	0,075	6,61	53,5		77,1			
(% PASSANTE)									
Argila:		34,75%							
Silte:		42,35%							
Areia Fina:		14,70%							
Areia Média:		3,63%							
Areia Grossa:		4,57%							
Pedregulho:									

Fonte: UFRGS, 2015.

Fonte: UFRGS, 2015.

UFRGS - Laboratório de Geotecnologia									
ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRÃOS									
Picnômetro nº 2									
Local: Joinville		Prof.:							
Amostra:									
Data:									
Picnômetro N ^o (2 ou 8)		2	2	2	2	2	2	2	2
Temperatura do Pic. + Solo + Água (°C)	T	40,7	39	35,4	30,3	27	23	19,1	14,9
Solo Úmido (gf)	W _h	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Picnômetro + Água (Calibração) (gf)	W _w = f(T)	659,51	659,85	660,52	661,37	661,85	662,36	662,78	663,16
Picnômetro + Água + Solo (gf)	W _{ws}	704,29	704,95	705,68	706,08	706,48	707,06	707,38	707,71
Solo Seco (gf)	W _s	69,55	69,55	69,55	69,55	69,55	69,55	69,55	69,55
Água Deslocada	W _w + W _s - W _{ws}	24,77	24,45	24,39	24,84	24,92	24,85	24,95	25,00
Peso Específico da água em T (g/cm ³)		0,9920	0,9927	0,9940	0,9957	0,9966	0,9976	0,9985	0,9992
Peso Específico Real dos Grãos (g/cm ³)	$\gamma_s = W_s \cdot \gamma_a / (W_w + W_s - W_{ws})$	2,785	2,824	2,834	2,788	2,782	2,792	2,783	2,780
	Média γ_s (g/cm ³)	2,796							
	Média γ_s (KN/m ³)	27,42							
Picnômetro 02 PYREX									
$y = -0.0024x^2 - 0.0079x + 663.8101$									

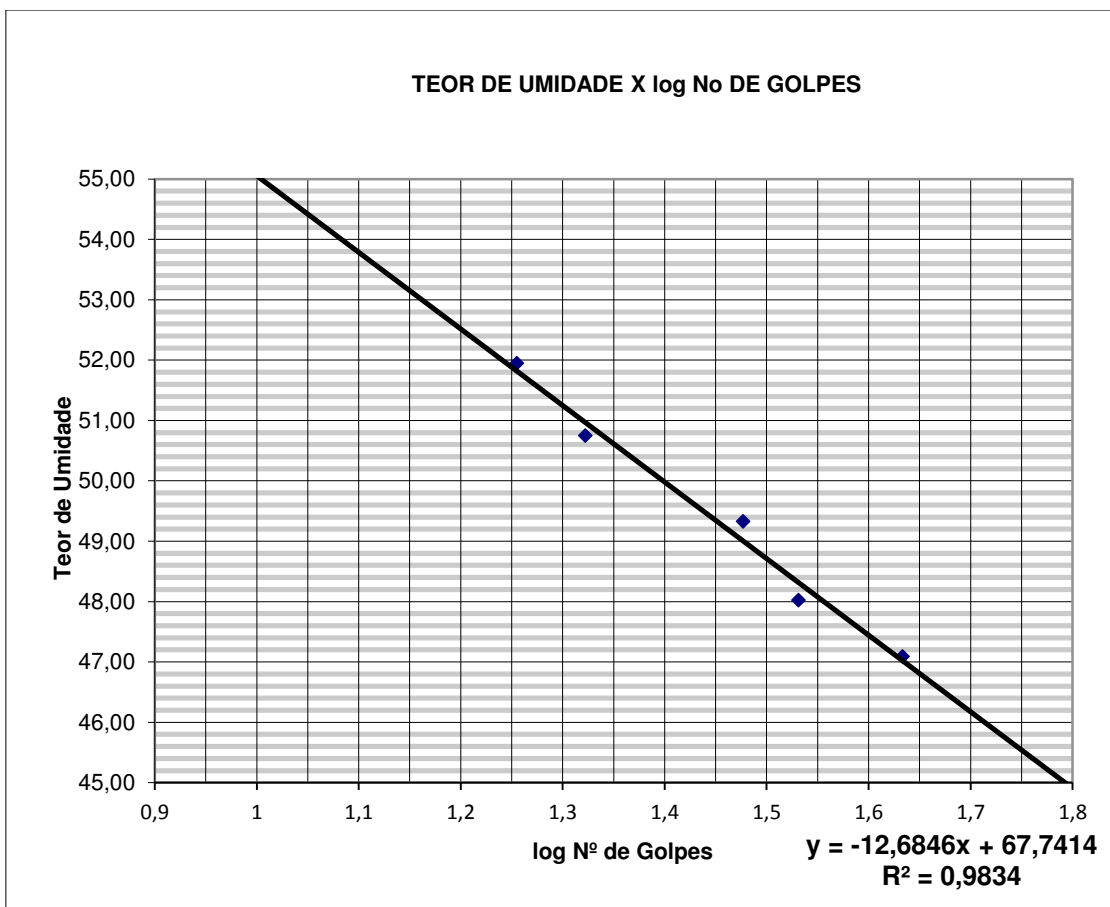
ANEXO IV – Ensaio para determinação do PERG

UFRGS - Laboratório de Geotecnologia									
LIMITES DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE									
Referências	Solo p/ sedimentação			Sondagem nº					
				Data	24/07/2015				
Profundidade				Classificação					
LIMITE DE PLASTICIDADE									
Nº da cápsula	121	13A	121	14	42				
Peso total úmido (gf)	9,02	25,63	33,3	9,16	9,45				
Peso total seco (gf)	8,65	25,25	32,91	8,77	8,97				
Peso da água (gf)	0,37	0,38	0,39	0,39	0,48				
Peso da cápsula (gf)	7,652	24,14	31,68	7,64	7,56				
Peso do solo seco (gf)	0,998	1,11	1,23	1,13	1,41				
Teor de Umidade (%)	37,07	34,23	31,71	34,51	34,04				
Limite de Plasticidade (%)	34,31								
LIMITE DE LIQUIDEZ									
Nº de golpes	18	43	30	34	21	28			
Nº da cápsula	47	37	43	14	44	42			
Peso total úmido	25,49	26,36	26,47	21,45	24,72	23,27			
Peso total seco	19,35	20,38	20,25	16,96	18,97	18,11			
Peso da água	6,14	5,98	6,22	4,49	5,75	5,16			
Peso da cápsula	7,53	7,68	7,64	7,61	7,64	7,56			
Peso do solo seco	11,82	12,7	12,61	9,35	11,33	10,55			
Umidade	51,95	47,09	49,33	48,02	50,75	48,91			
Umidade média									
ÍNDICE DE PLASTICIDADE									
Limite de Liquidez (%)	50,0								
Limite de Plasticidade (%)	34,3								
Índice de Plasticidade (%)	15,7								

ANEXO VI – Cálculo do Limite de Liquidez (LL)

LIMITE DE LIQUIDEZ	
Referências	Solo p/ sedimentação
Profundidade	

log(Nº de golpes)	Umidade (%)
1,255272505	51,95
1,633468456	47,09
1,477121255	49,33
1,531478917	48,02
1,322219295	50,75
1,447158031	48,91
Coeficientes	
a=	-12,6846
b=	67,7414
LL (%)=	50,0



Fonte: UFRGS, 2015.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457 – Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** 9p, ANBT, 1986.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez.** 6p, ANBT, 1984.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6508 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica.** 8p, ANBT, 1984.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.** 3p, ANBT, 1984.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9895 – Solo – Índice de Suporte Califórnia.** 14p, ANBT, 1987.
- ASTM, D6951-09. **Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications.** 7p, ASTM, 2009.
- ALVES, B. C., **Avaliação da capacidade de suporte e controle tecnológico de execução da camada final de terraplenagem utilizando o Penetrômetro Dinâmico de Cone**, 185p, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- ANDRADE, I., **Determinação dos parâmetros de resistência no estado compactado dos solos do município de Tubarão através das correlações entre os ensaio DCP e CBR**, 46p, Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2006.
- BERTI, C., **Avaliação da capacidade de suporte de solos “in situ” em obras viárias através do cone de penetração dinâmica Estudo experimental**, 142p, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- BUMHARN, T., JOHNSON, D., **In situ foundation characterization using the dynamics cone penetrometer**, 42p, Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN, 1993.
- CARVALHO, R. G., **Correlações entre os ensaios DCP e CBR para solos saprolíticos de textura fina**, 142p, Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.
- COZZOLINO, V.; NOGAMI, J. **Classificação geotécnica MCT para solos tropicais.** 15p, São Paulo, São Paulo, 1993.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, **DNER – ME 049/94:** – Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, IPR, 1994. 14p.

FONTES, L. P., **Contribuição à investigação geotécnica de vias urbanas não pavimentadas através do emprego do Penetrômetro Dinâmico de Cone**, 201p, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

HEIDEMANN, M., **Estudo dos solos de uma encosta instável em São José - SC: intemperismo e comportamento geotécnico**, 299p, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2015.

IDOT – Illinois Department of Transportation, **Pavement technology advisory – Dynamic Cone Penetrometer – PTA-T4**, 3p, Illinois, 2005.

LIMA, L. C., **O Ensaio DCP Aplicado no Controle de Qualidade de Compactação de Obras Viárias Executadas com Solos Lateríticos de Textura Fina**. 164p, Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. ITA, São José dos Campos, São Paulo, 2000.

MACHADO, R., **Estudo Aplicado da Solução de Projeto de Pavimentação para Pátio de Estacionamento de Ônibus**. 95p, Dissertação de Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina. UFSC. Joinville, Santa Catarina, 2015.

SENÇO, W., **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Volume 1. 2ª Ed. São Paulo: Editora PINI, 2007. 761p.

SOUZA, A. R., **Estudo comparativo dos ensaios de CBR e Mini-CBR para solos de Uberlândia – MG**, 114p, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.