

CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG
REINALDO HORST RINALDI

**ANÁLISE DO GRAU DE COMPACTAÇÃO ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CONE DE
PENETRAÇÃO DINÂMICA (CPD) EM SOLO LATERÍTICO DE CASCAVEL/PR**

CASCAVEL - PR

2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG
REINALDO HORST RINALDI

**ANÁLISE DO GRAU DE COMPACTAÇÃO ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CONE DE
PENETRAÇÃO DINÂMICA (CPD) EM SOLO LATERÍTICO DE CASCAVEL/PR**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Orientador: Prof. Me. Eng. Civil Maycon André de Almeida.

CASCAVEL - PR
2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

REINALDO HORST RINALDI

**ANÁLISE DO GRAU DE COMPACTAÇÃO ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CONE DE
PENETRAÇÃO DINÂMICA (CPD) EM SOLO LATERÍTICO DE CASCAVEL/PR**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Professor Me. Eng. Civil Maycon André de Almeida.

BANCA EXAMINADORA

Orientador Professor Me. Maycon André de Almeida
Centro Universitário Assis Gurgacz – FAG
Engenheiro Civil

Professor Esp. Lincoln Salgado
Centro Universitário Assis Gurgacz - FAG
Engenheiro Civil

Professor Me. Guilherme Irineu Venson
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste
Engenheiro Civil

Cascavel, 19 de Junho de 2017.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Antonio e Alice, que sempre me apoiaram e incentivaram meus estudos. Dedico também à toda minha família, pelo amor infinito e compreensão, fontes de minha extrema motivação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao Autor da Existência, aquele que permite que todas as coisas se concretizem, nosso único e verdadeiro Deus.

Em segundo lugar agradeço a todas as pessoas que diretamente ou indiretamente, contribuíram para a construção dos meus valores: meus pais, os mestres do passado e todos os que compartilharam um pouco do que sabem comigo e com os meus amigos nesta vida acadêmica.

Não vou deixar de agradecer a compreensão de pessoas especiais, quando minha presença não foi possível e quando minha preocupação e atenção pareciam se voltar exclusivamente para este trabalho, obrigado Mãe e Pai.

Agradeço aos amigos laboratoristas, o meu muito obrigado pelo auxílio no trabalho de laboratório. Ao amigo e orientador Prof. Me. Maycon André de Almeida o mais sincero agradecimento.

EPÍGRAFE

“Só há duas maneiras de viver a vida: a primeira é vivê-la como se os milagres não existissem. A segunda é vivê-la como se tudo fosse milagre.”

Albert Einstein.

RESUMO

O ensaio de simples reconhecimento dos solos é extremamente importante para se identificar as características do subsolo. Tal conhecimento implica na prospecção do subsolo e na amostragem ao longo de seu curso. Para que estes dados possam ser considerados como fiel retrato das condições naturais do subsolo, é necessário que os serviços de prospecção sejam elaborados por pessoal altamente capacitado. Seus resultados podem ser utilizados em diversas áreas, mas é na engenharia civil que esse método é mais difundido. O método de reconhecimento do solo é o passo que antecede a compactação, sendo este um método de melhoramento de solos que se dá por aplicação de alguma forma de energia. O trabalho em questão tem como objetivo, analisar o grau de compactação do solo, através da aplicação do Cone de Penetração Dinâmico (CPD), considerando a variação da umidade em um solo laterítico e colapsível, realizando para tanto, ensaios em laboratório com amostras de solo da região de Cascavel - PR.

Palavras-chave: Cone de Penetração Dinâmico (CPD). Solos. Compactação. Ensaio Geotécnico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva de compactação	21
Figura 2: Efeito da energia de compactação	21
Figura 3: Curvas de compactação de solos finos	22
Figura 4: Curva de compactação de uma areia	22
Figura 5: Cilindro de Compactação	25
Figura 6: Soquete para Compactação	25
Figura 7: (a) Partes que constituem o Cone de Penetração Dinâmica; (b) Cone de Penetração Dinâmica completa.	27
Figura 8: Gráfico do CPD	28
Figura 9: Localização	30
Figura 10: Cavas executados	32
Figura 11: Material coletado para execução dos ensaios	32
Figura 12: Material coletado acomodado em bandejas e separados para ir à estufa	33
Figura 13: Destorroamento do material com auxílio de soquete.	33
Figura 14: Material passante na peneira 4,75mm	33
Figura 15: Corpo de Prova sendo preparado para compactação com soquete	35
Figura 16: Corpo de Prova sendo extraído com auxílio do extrator	35
Figura 17: Corpo de Prova sendo pesado	35
Figura 18: Corpos de Prova sendo moldados simultaneamente	37
Figura 19: Corpo de Prova sendo centralizado por meio de travamento.	37
Figura 20: Ensaio CPD sendo executado	37
Figura 21: Curvas de Compactação com diferentes energias	39
Figura 22: Massa Específica Seca x Grau de Compactação	41
Figura 23: Grau de Compactação – Proctor Normal x Penetração	42
Figura 24: Grau de Compactação – Proctor Intermediário x Penetração	42
Figura 25: Grau de Compactação – Proctor Modificado x Penetração	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Índices Físicos	19
Tabela 2: Massas mínimas das amostras de material úmido, em função do tamanho máximo das partículas	23
Tabela 3: Energias de Compactação	24
Tabela 4: Valores médios por camadas	31
Tabela 5: Ensaio de Proctor x Ensaio CPD	41

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Grau de Compactação	20
Equação 2: Índice de penetração	28
Equação 3: Proctor Normal	42
Equação 4: Proctor Intermediário	43
Equação 5: Proctor Modificado	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO – American Association Of State Highway And Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

CBR – California Bearing Ratio

CEEF – Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário da Faculdade Assis Gurgacz

CP – Corpo de Prova

CPD – Cone de Penetração Dinâmico

CPE – Cone de Penetração Estática

DCP – Dynamic Cone Penetrometer

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

FAG – Faculdade Assis Gurgacz

FSP – Faculdade Sudoeste Paulista

GC – Grau de Compactação

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos

TBR – Sistema de Classificação Rodoviário ()

W_o – Teor de Umidade Ótimo

$\gamma_{d_{\text{máx}}}$ – Peso Específico Seco Máximo

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	13
1.1 INTRODUÇÃO	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
1.3 JUSTIFICATIVA	15
1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	15
1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	15
CAPÍTULO 2	16
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1.1 Solos	16
2.1.2 Classificação dos Solos	16
2.1.3 Índices Físicos	17
2.1.4 Compactação de Solos	19
2.1.5 Efeito da Energia de Compactação	20
2.1.6 Influência do Tipo de Solo	21
2.1.7 Ensaio Geotécnicos	22
2.1.7.1 Ensaio de umidade	22
2.1.7.2 Ensaio de Proctor	23
2.1.7.3 Cone de Penetração Dinâmica - CPD	26
CAPÍTULO 3	30
3.1 METODOLOGIA	30
3.1.1 Tipo de Estudo e Local da Pesquisa	30
3.1.2 Caracterização da Amostra	30
3.1.3 Coleta de Dados	31
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	32
3.2.1 Proctor	32
3.2.2 Cone de Penetração Dinâmico (CPD)	36
CAPÍTULO 4	38
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1.1 Disposições Gerais e Coleta das Amostras	38
4.2 ENSAIO DE PROCTOR	38

4.3 ENSAIO DE CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA (CPD).....	39
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
ANEXOS	50

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das condições de um solo em um determinado local é uma condição fundamental para a elaboração de projetos de pavimentações, fundações e obras de contenção seguras e econômicas. No Brasil, estima-se que o custo envolvido na realização das sondagens de reconhecimento varie normalmente de 0,2% a 0,5% do custo total da obra (SCHNAID, 2000).

Além das sondagens é importante ter outras ferramentas para analisar e ajudar na tomada de decisão, portanto desenvolver novas técnicas de monitoramento das características geotécnicas e compactação dos solos é de suma importância.

A compactação é um método de melhoramento de solos que acontece por meio aplicação de alguma forma de energia (impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica). Seu efeito confere ao solo um aumento de seu peso específico e resistência ao cisalhamento, e uma redução do índice de vazios, permeabilidade e compressibilidade.

Segundo Caputo (1987), um dos ensaios de compactação mais comumente utilizados é o de Proctor, o qual é creditada ao engenheiro norte-americano Proctor que, em 1933, publicou suas observações sobre compactação de aterros, mostrando que, ao aplicar-se uma certa energia de compactação (um certo número de passadas de um determinado equipamento no campo ou um certo número de golpes de um soquete sobre o solo contido num molde), a massa específica resultante é função da umidade em que o solo estiver.

Atualmente, tendo em vista o maior peso dos equipamentos de compactação, tornou-se necessário alterar as condições do ensaio, para manter a indispensável correlação com o esforço de compactação no campo. Surgiu, assim, o ensaio modificado de Proctor ou AASHO Modificado. Neste novo tipo de ensaio, embora a amostra seja compactada no mesmo molde, isto é feito, no entanto, em cinco camadas, sob a ação de um soquete com maior peso, e um molde com maior altura.

Por outro lado, utilizado como um método “*in situ*” de avaliação da capacidade de suporte de solos, surge o Cone de Penetração Dinâmica (CPD) ou “Dynamic Cone Penetrometer” (DCP).

Sendo este um equipamento que fornece a taxa de penetração realizado em solos indeformados ou materiais compactados. Tal ensaio surgiu com o objetivo de se produzir um

equipamento simples e versátil para estudos sobre as propriedades mecânicas “*in situ*” de solos do subleito. Dessa forma, apresenta vantagens em relação aos procedimentos tradicionais realizados em laboratório.

Segundo Alves (2002), este ensaio apresenta a grande vantagem de investigar o subleito de forma econômica, pois não requer grandes escavações ou perfurações, e em consequência não interfere no tráfego dos veículos. Pode ser caracterizado como um ensaio semi não-destrutivo. A diferença entre os ensaios citados, se dá pela diferença de resultados.

A correlação de resultados entre esses ensaios é desejável para se estimarem os valores entre ensaios de um mesmo material. Valores provenientes dos mesmos são uma função do método de realização do ensaio, do teor de umidade e da densidade. Ao estimar valores de resistência de um solo, sem considerar esses fatores, é comum gerar suposições errôneas (YODER, 1959 *apud* BERNUCCI, 2006).

Portanto, visando minimizar tais suposições, foi considerado a variação de umidade para o solo de modo a ter uma correlação entre o CPD e o ensaio de compactação Proctor.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o grau de compactação de solos através de ensaio com penetrômetro dinâmico, considerando a variação da umidade em um solo laterítico e colapsível típico da região de Cascavel - PR.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Verificar a compactação do solo através do CPD, realizando os ensaios de Cone de Penetração Dinâmica (CPD) e Proctor;
- Aplicar a correlação numérica existente na literatura nacional e verificar a validade do mesmo.

1.3 JUSTIFICATIVA

Com este trabalho buscou-se viabilizar o ensaio prático e instantâneo de Cone de Penetração Dinâmica (CPD), para análise do grau de compactação do solo, fazendo assim uma correlação com o ensaio de Proctor, para o solo da região de Cascavel - PR.

1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Diante das novas necessidades do mercado da construção civil, o corte de custos se faz necessário sempre que possível. Tendo em vista que ensaios de resistência como o CBR são longos e custosos, surge a necessidade de ensaios mais práticos, como o CPD, sem dependerem de altos valores para a aquisição dos equipamentos e na operação de seus ensaios. O Cone de Penetração Dinâmica (CPD) quando utilizado “*in situ*” oferece maior precisão nos dados obtidos, além de maior rapidez na obtenção de tais valores, portanto é ideal que se compare o CPD com o grau de Compactação do Solo.

1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Para a realização dos ensaios mencionados, foi utilizado o solo do primeiro metro do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário da Faculdade Assis Gurgacz (CEEF), trata-se de um local com solo residual característico da região. Neste local foram utilizados Pontos de Inspeção que já estão executados no campus da FAG, de forma que foi coletado aproximadamente 20 kg de material para a realização dos ensaios em laboratório.

CAPÍTULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Solos

O solo deve ser considerado sob o aspecto de ente natural e, como tal é tratado pelas ciências que estudam a natureza, como a geologia, a pedologia e a geomorfologia. A palavra solo não tem um significado intuitivo imediato. Em português clássico, o termo solo significa a superfície do chão, originada da palavra herdada do latim “*solum*”. (UFJF, 2009). A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da (NBR 6502/95) define solo como “Material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica”, ou simplesmente, produto da decomposição e desintegração da rocha pela ação de agentes atmosféricos.

Segundo Pinto (2006), em geologia os depósitos produtos da decomposição e desintegração, denominam-se manto ou regolito. O termo solo se reserva para a capa superior desagregada, que mantém as plantas. Por outra parte, em engenharia civil, o material que o geólogo denomina manto, é vulgarmente conhecido como solo ou terra.

Para o engenheiro civil, os solos são um aglomerado de partículas provenientes de decomposição da rocha, que podem ser escavados com facilidade, sem o emprego de explosivos, e que são utilizados como material de construção ou de suporte de estruturas.

2.1.2 Classificação dos Solos

O objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista de engenharia, é poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema.

Segundo Pinto (2006), é muito discutida a validade dos sistemas de classificação. De um lado, qualquer sistema cria grupos definidos por limites numéricos descontínuos, enquanto solos naturais apresentam características progressivamente variáveis. Conforme apontado por

Terzaghi (1962 *apud* PINTO, 2016, p. 57) “um sistema de classificação sem índices numéricos para identificar os grupos é totalmente inútil”.

Ainda segundo Pinto (2006), existem diversas formas de classificar os solos, como pela sua origem, pela sua evolução, pela presença ou não de matéria orgânica, pela estrutura, pelo preenchimento dos vazios. Os sistemas baseados no tipo e no comportamento das partículas que constituem os solos são os mais conhecidos na engenharia de solos. Deve se levar em conta que outras classificações, que levam em consideração a origem do solo e sua evolução natural, são muito úteis, com informações complementares que, em certos casos, são bastante relevantes. Os sistemas de classificação que se baseiam nas características dos grãos que constituem os solos tem como objetivo a definição de grupos que apresentam comportamentos semelhantes sob os aspectos de interesse da Engenharia Civil. Nestes sistemas os índices empregados são geralmente a composição granulométrica e os índices Atterberg.

De particular interesse para o Brasil é a identificação dos solos lateríticos, típicos da evolução de solos em clima quente, com regime de chuvas moderadas a intensas. A denominação de lateríticos incorporou-se à terminologia dos engenheiros, embora não seja mais usada nas classificações pedológicas. De acordo com Freire, Rodrigues e Soares (1999, p. 83):

Os solos lateríticos têm sua fração argila constituída predominantemente de minerais cauliníticos e apresentam elevada concentração de ferro e alumínio na forma de óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos, donde sua peculiar coloração avermelhada. Esses sais encontram-se, geralmente, recobrimdo agregações de partículas argilosas.

Na natureza, os solos lateríticos apresentam-se, geralmente, não saturados, com índice de vazios elevado, daí sua pequena capacidade de suporte. Quando compactados, sua capacidade de suporte é elevada, e por isto são muito empregados em pavimentação e aterros. Após compactado, um solo laterítico apresenta contração se o teor de umidade diminuir, mas não apresenta expansão na presença de água.

2.1.3 Índices Físicos

De acordo com a Faculdade Sudoeste Paulista (FSP, 2013, p. 3) em uma massa de solo podem:

Ocorrer três fases: a fase sólida, a fase gasosa e a fase líquida. A fase sólida é formada pelas partículas minerais do solo, a fase líquida por água e a fase gasosa compreendem

todo o ar existente nos espaços entre as partículas. Portanto, o solo é um sistema trifásico, onde a fase sólida é um conjunto discreto de partículas minerais dispostas a formarem uma estrutura porosa que conterà os elementos constituintes das fases líquida e gasosa.

As partículas sólidas do solo são pequenos grãos de diferentes minerais, cujos vazios podem ser preenchidos por água, ar, ou parcialmente por ambos (ar e água). Define-se mineral como uma substância inorgânica e natural, com uma estrutura interna definida (átomos e íons) e com composição química e propriedades físicas fixas ou variam dentro de limites definidos. As partículas sólidas dos solos grossos são constituídas por silicatos (feldspatos, micas, olivinas, etc.), óxidos (quartzo), carbonatos (calcita, dolomita), sulfatos (limonita, magnetita). Já os solos finos são constituídos por silicatos de alumínio hidratado (argilo-minerais). Os índices físicos dos solos são utilizados na caracterização de suas condições, em um dado momento e por isto, podendo ser alterados ao longo do tempo, sendo descritos e apresentados na Tabela 1.

Índice de vazios é a relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume dos sólidos (V_s), existente em igual volume de solo. Este índice tem como finalidade indicar a variação volumétrica do solo ao longo do tempo. O índice de vazios será medido por um número natural e deverá ser, obrigatoriamente, maior do que zero em seu limite inferior, enquanto não há um limite superior bem definido, dependendo da estrutura do solo. O volume de sólidos permanecendo constante ao longo do tempo, qualquer variação volumétrica será medida por uma variação do índice de vazios, que assim poderá contar a história das tensões e deformações ocorridas no solo. Exemplo de valores típicos do índice de vazios para solos arenosos podem situar de 0,4 a 1,0; para solos argilosos, variam de 0,3 a 1,5. Nos solos orgânicos, pode-se encontrar valores superiores a 1,5. O grau de saturação indica que porcentagem do volume total de vazios contem água. Se o solo está completamente seco, então seu valor é igual a zero, se os poros estão cheios de água, então o solo está saturado sendo igual a cem por cento. Para solos parcialmente saturados, os valores situam-se entre 1 e 99%. O teor de umidade (w) de um solo é determinado como a relação entre o peso de água (M_w) e o peso das partículas sólidas (M_s) em um volume de solo. O teor de umidade pode assumir o valor de zero para solos secos até valores superiores a 100% em solos orgânicos. O peso específico seco (γ_d) é a relação entre o peso dos sólidos (M_s) e o volume total da amostra (V), para a condição limite do grau de saturação é igual a zero. O teor de umidade é definida como a massa da água contida em uma amostra de solo dividido pela massa de solo seco, sendo expressa em quilogramas de água por

quilogramas de solo, ou, multiplicando-se por 100, tem-se em percentagem. Os índices físicos citados acima estão representados em forma de equações na Tabela 1.

Tabela 1: Índices Físicos

Equações	
Volume	$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_{ar}$
Índice de vazios	$e = \frac{V_v}{V_s}$
Grau de saturação	$S_r (\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100$ (V_w é o volume da água)
Teor de umidade	$W (\%) = \frac{M_w}{M_s} \times 100$
Peso específico seco	$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$
Teor de umidade	$h = \frac{M_w - M_s}{M_s - m} \times 100$

Fonte: Autor (2017)

2.1.4 Compactação de Solos

Segundo Massad (2003), entende-se por compactação de um solo qualquer redução, mais ou menos rápida, do índice de vazios, por processos mecânicos. Essa redução ocorre em face da expulsão ou compressão do ar dos vazios dos poros. Difere, portanto, do adensamento, que também é um processo de densificação, mas decorre de uma expulsão lenta da água dos vazios do solo.

A compactação objetiva imprimir ao solo uma homogeneização e melhorias de suas propriedades de engenharia, tais como: aumentar a resistência ao cisalhamento, reduzir os recalques e aumentar a resistência a erosão. Os estudos geotécnicos de compactação tiveram início com a teoria de compactação desenvolvida por Ralph Proctor. Em 1933, divulgou seu método de controle de compactação e concluiu que a densidade com que um solo é compactado, sob uma determinada energia de compactação, depende do teor de umidade do solo (ESCOLA ENGENHARIA, 2013).

Por outro lado, Santos (2008, p. 1) cita que a:

Compactação provoca um aumento do grau de saturação visto que o volume de vazios sofre uma redução por expulsão do ar. Contudo a expulsão de todo o ar, não é possível, verificando-se que fica sempre algum ar aprisionado entre os grãos de solo. Com este processo a área de contato das partículas sólidas aumenta, aumentando assim a resistência do solo e diminuindo a sua deformabilidade. Além disso, o solo ficando

num estado mais denso dificultará a passagem da água, ou seja, torna-se menos permeável.

A compactação dos solos é geralmente representada em um gráfico da variação do peso específico aparente seco (γ_d) versus o teor de umidade (w) correspondente durante o processo de compactação.

O ramo ascendente da curva de compactação é denominado ramo seco e o ramo descendente de ramo úmido. No ramo ascendente, a água lubrifica as partículas e facilita o arranjo destas, ocorrendo, por esta razão, o acréscimo da massa específica aparente seca. Já no ramo descendente, a água amortiza a compactação e a amostra passa a ter mais água que sólidos, levando a um decréscimo da massa específica aparente seca. Durante o processo de compactação dos solos, o teor em água no solo mantém-se praticamente constante, sendo esta característica frequentemente referida como a principal diferença entre a compactação e a consolidação de solos (ESCOLA ENGENHARIA, 2013).

Para verificar se o controle de compactação está sendo feito corretamente, deve-se determinar sistematicamente o w_o e o γ_d do material. Para esse controle pode ser utilizado o speedy test na determinação da umidade, e o processo do “frasco de areia” na determinação do peso específico, sendo que o Grau de Compactação (GC) pode ser obtido pela Equação 1.

$$GC = \frac{\gamma_d \times 100}{\gamma_{d_{Máx}}} \quad (1)$$

Não atingida a compactação desejada, deve-se revolver o material e recompactar.

2.1.5 Efeito da Energia de Compactação

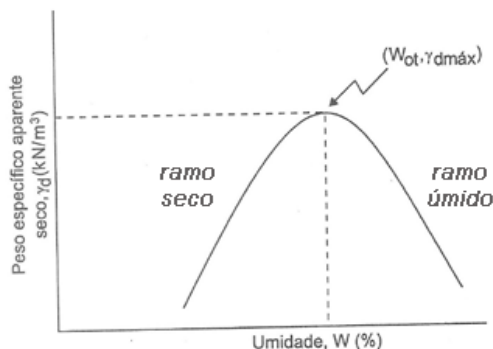
Chama-se energia de compactação o trabalho realizado durante o processo de compactação de uma amostra de solo de volume final, com efeito, de aplicar a um mesmo solo com determinado teor em água energias de compactação diferentes, o estado final (medido através do peso específico seco) seria diferente. Isto quer dizer que a cada energia de compactação corresponde a uma curva de compactação (SANTOS, 2008). Considerando que a curva da Figura 1 correspondia uma energia de compactação E1, tem-se que, se for aplicada ao mesmo solo uma energia de compactação E2, se obteria o resultado que se apresenta na Figura 2.

Constata-se assim que a maior energia de compactação corresponde um peso específico seco maior, que é obtido para um teor em água ótimo (w_o) menor, resultando, portanto, numa curva deslocada para cima e para a esquerda da curva correspondente à menor energia de compactação.

2.1.6 Influência do Tipo de Solo

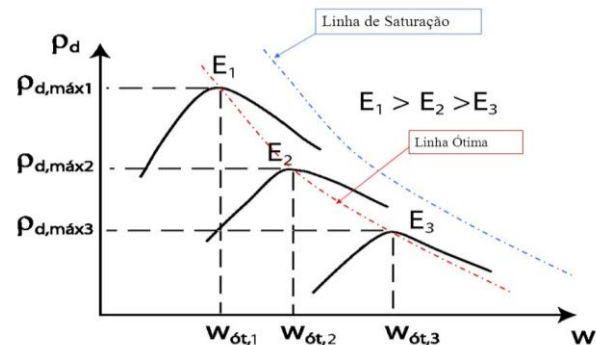
O gráfico da Figura 1, denominado Curva de compactação é obtida através de ensaio de Proctor marcando-se, em ordenadas, os valores dos pesos específicos secos (γ_d) e, em abscissas, os teores de umidade correspondentes (w) e representa o comportamento do solo mediante compactação. Onde o ponto de ápice indica o ponto onde o solo tem seu máximo de compactação, ou seja, apresenta menor redução de vazios possível. Deste modo, temos que nos solos mais grosseiros o teor de água ótimo (w_o) é, em regra, mais reduzido, atingindo valores mais elevados do peso específico. Já nos solos com maior predominância de argila o teor em água ótimo (w_o) é mais elevado, conduzindo a valores mais reduzidos do peso específico seco, como se mostra na Figura 3. A curva de compactação nem sempre apresenta a forma regular da Figura 1.

Figura 1: Curva de compactação



Fonte: Escola Engenharia (2014).

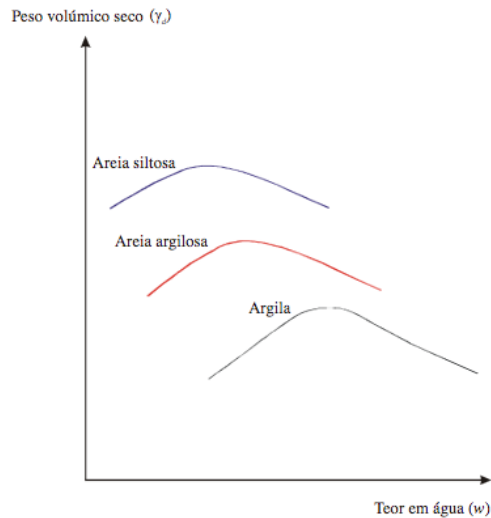
Figura 2: Efeito da energia de compactação



Fonte: Escola Engenharia (2013).

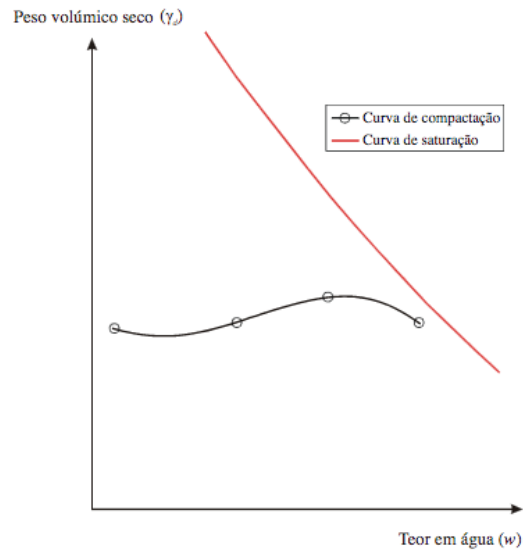
Os solos granulares sem finos (ex: areias limpas), sendo bastante permeáveis, são pouco sensíveis ao teor em água, pelo que a curva de compactação destes solos não possui um pico tão pronunciado como nos solos com granulometria mais extensa e verifica-se que o peso específico seco aumenta para teores em água muito baixos devido à ação de tensões capilares entre partículas (SANTOS, 2008), conforme mostra a Figura 4.

Figura 3: Curvas de compactação de solos finos



Fonte: Guedes (2008)

Figura 4: Curva de compactação de uma areia fina



Fonte: Guedes (2008)

2.1.7 Ensaios Geotécnicos

2.1.7.1 Ensaio de umidade

Para Cardoso (2014, p. 2) a análise da umidade do solo possui:

Grande importância no ramo da construção civil, pois por meio dessa determinação pode-se identificar a quantidade exata de água necessária para obter uma melhor compactação do solo, bem como se o teor de umidade está na quantidade necessária para alcançar maior resistência do solo. Todo esse processo é necessário, considerando que é sobre o solo que as estruturas são apoiadas.

Segundo a norma do DNER-ME 213/94 que prescreve o método de determinação do teor de umidade de solos, expressa que o teor de umidade de um solo é a relação entre a massa de água presente em um certo volume de solo e a massa das partículas sólidas, no mesmo volume, expressa em percentagem. Ainda propõem que a resolução na balança, é a expressão quantitativa da aptidão de um instrumento de medida de distinguir valores muito próximos da grandeza a medir sem necessidade de interpolação.

A aparelhagem necessária para o teste é composto por: estufa elétrica, controlada automaticamente por termostato e capaz de manter a temperatura entre 110°C +/- 5°C; balança com resolução de 0,1% e recipientes de material resistentes, dispondo de tampas para evitar a

perda de umidade das amostras nelas contidos antes da pesagem, e evitar a absorção de umidade da atmosfera após a secagem e durante a pesagem final.

Para a amostragem do material, deve-se coletar uma amostra representativa do material do qual se deseja determinar o teor de umidade, na quantidade prescrita pelo método que se estiver executando. Caso não haja indicação dessa quantidade, adotar as massas mínimas constantes da Tabela 2.

Tabela 2: Massas mínimas das amostras de material úmido, em função do tamanho máximo das partículas

Tamanho máximo das partículas mm (peneira)	Massa mínima da amostra úmida g
0,42 (nº 40)	10
4,8 (nº 4)	100
12,5	300
25,0	500
50,0	1000

Fonte: Norma DNER-ME 213/94 (1994)

O ensaio é realizado da seguinte forma, deve-se pesar o recipiente, limpo e seco, com a respectiva tampa, anotando-se o valor obtido de sua massa. Colocar dentro do recipiente a amostra úmida, fechando-o com a tampa, imediatamente. Pesar o conjunto, anotando-se o valor obtido como a massa úmida, M_w . Remover a tampa e colocar o conjunto na estufa elétrica à temperatura constante, mantendo-o na estufa por 24 horas, em seguida é pesada e anotada obtendo assim a massa seca M_s . Após a coleta das massas é necessário fazer a relação da massa de água da amostra pela massa de partículas seca da amostra.

2.1.7.2 Ensaio de Proctor

O Ensaio de Proctor foi padronizado no Brasil pela ABNT (NBR 7182/86). Em sua última revisão, a norma apresenta diversas alternativas para a realização do ensaio. Em seu ensaio original, Pinto (2206, p. 78) diz que “a amostra de solo deve ser previamente seca ao ar e destorroada. Inicia-se o ensaio, acrescentando-se água até que o solo fique com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima. Não é tão difícil perceber isto, como poderia parecer à primeira vista”. Quando se manuseia um solo, percebe-se uma umidade relativa que depende dos limites de liquidez e plasticidade. Da mesma forma, qualquer operador, ao manusear um

solo, percebe se ele está acima ou abaixo da umidade ótima, que geralmente é muito próxima e um pouco abaixo do limite de plasticidade.

Existem 3 modalidades do ensaio, normal, intermediária e modificada, que variam de acordo com a energia de compactação empregada na amostra, apresentada na tabela 3. Segundo Pinto (2006), o ensaio Proctor Normal utiliza o cilindro de 10 cm de diâmetro, altura de 12,73 cm e volume de 1.000 cm³ é submetida a 26 golpes de um soquete com massa de 2,5 Kg e caindo de 30,5 cm. Corresponde ao efeito de compactação com os equipamentos convencionais de campo. O ensaio Modificado utiliza o cilindro de 15,24 cm de diâmetro, 11,43 cm de altura, 2.085 cm³ de volume, peso do soquete de 4,536 kg e altura de queda de 45,7 cm aplicando-se 55 golpes por camada. É utilizado nas camadas mais importantes do pavimento, para os quais a melhoria das propriedades do solo, justifica o emprego de uma maior energia de compactação. O ensaio denominado Intermediário difere do modificado só pelo número de golpes por camada que corresponde a 26 golpes por camada, sendo aplicado nas camadas intermediárias do pavimento.

Tabela 3: Energias de Compactação

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camadas	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: NBR 7182/86 (1986)

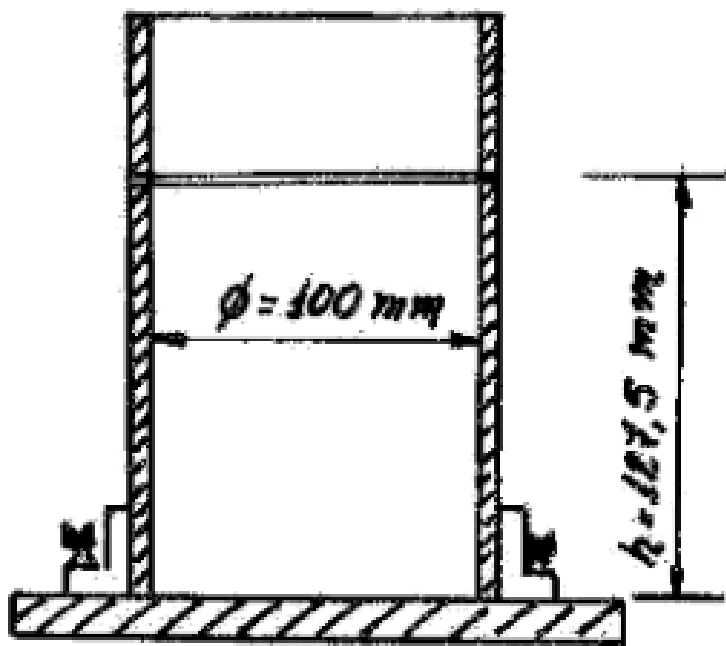
Para o ensaio de Proctor normal, com a umidade bem uniformizada, uma porção do solo é colocada num cilindro padrão 10 cm de diâmetro, altura de 12,73 cm, volume de 1 litro (Figura 5), e submetida a 26 golpes de um soquete com massa de 2,5 kg e caindo de 30,5 cm, conforme Figura 6. Anteriormente, o número de golpes era 25, a alteração da norma para 26 foi feita para ajustar a energia de compactação ao valor de outras normas internacionais, levando em conta que as dimensões do cilindro padronizado no Brasil são um pouco diferentes dos demais.

Para Pinto (2006, p. 78-79) a porção de solo compactado:

Deve ocupar cerca de um terço da altura do cilindro. O processo é repetido mais duas vezes, atingindo-se uma altura um pouco superior à do cilindro, o que é possibilitado por um anel complementar. Acerta-se o volume raspando o excesso. Determina-se a massa específica do corpo de prova obtido. Com uma amostra de seu interior, determina-se a umidade. Com esses dois valores, calcula-se a densidade seca.

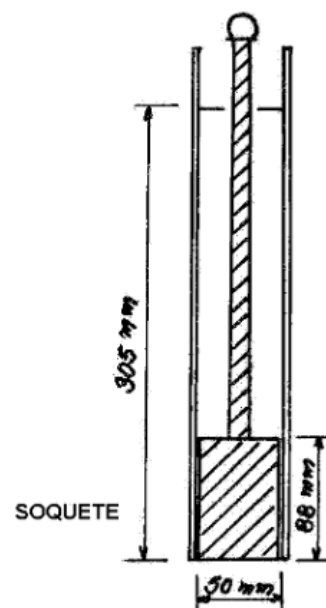
A amostra é destorroadada, a umidade aumentada com acréscimo de 150 ml de água, nova compactação é feita, e novo par de valores umidade-densidade seca é obtido. A operação é repetida sucessivamente até não ser possível mais compactar o corpo de prova no cilindro.

Figura 5: Cilindro de Compactação



Fonte: Guedes (2008)

Figura 6: Soquete para Compactação



Fonte: Guedes (2008)

Em suma com a amostra já preparada de acordo com a NBR 9895/87 e a definição do tamanho do cilindro e o tipo do soquete, o Ensaio de Proctor pode ser iniciado seguindo os passos da NBR 7182/86.

Com a amostra do solo deformada para a realização do ensaio, deve-se primeiramente colocar em bandejas para que a mesma adquira a umidade hidrosfópica (secagem ao ar), e, após isso, o solo deve ser destorroadado e passar pela peneira 4,75 mm adicionando-se água à amostra para obtenção do primeiro ponto da curva de compactação. Preparada a amostra de solo, ela deve ser colocada em um recipiente cilíndrico padrão, utiliza-se um soquete para a compactação, podendo ser o grande ou pequeno, isto varia conforme a energia do ensaio definida, de forma que a altura de queda, a divisão das camadas e o número de golpes do soquete é definida da mesma forma.

Esse processo é repetido para teores de umidades diferentes, utilizando-se, em média, quatro pontos para se obter a curva de compactação. Cada corpo de prova assim obtido determina o peso específico do solo seco e o teor de umidade de compactação. Após efetuar os cálculos dos pesos específicos e teores de umidade, deve-se lançar os valores obtidos num par de eixos cartesianos, tendo, nas ordenadas, os pesos específicos e, nas abscissas, os teores de umidade. Para a energia de compactação, mantém-se o mesmo procedimento, entretanto em um ensaio de compactação poderá ser realizado utilizando diferentes energias. A influência de energia pode causar interferência na curva de compactação, pelo fato de que à medida que se aumenta a mesma, há uma redução no teor de umidade ótima e também uma elevação no valor do peso específico seco máximo.

2.1.7.3 Cone de Penetração Dinâmica - CPD

Segundo Jordão (2009, p. 33) o Cone de Penetração Dinâmica ou “Dynamic Cone Penetrometer” (DCP) “é um equipamento que fornece a taxa de penetração realizado em solos indeformados ou materiais compactados”. Este ensaio surgiu com o objetivo de produzir um equipamento que simplificasse os estudos sobre as propriedades mecânicas “*in situ*” de solos do subleito.

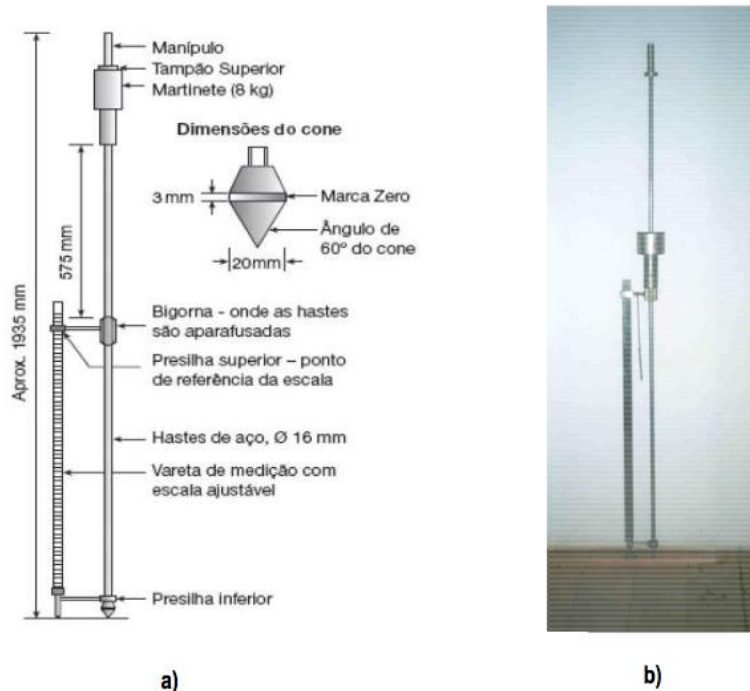
Conforme Alves (2002), este ensaio expressa grande vantagem de investigar o subleito de maneira econômica, pois não há necessidade de grandes escavações ou perfurações, e consequentemente não interfere no tráfego dos veículos. Podendo ser caracterizado como um ensaio semi não-destrutivo.

Desde 1973, vem sendo utilizado para medições rápidas de resistência “*in situ*” de camadas de pavimento na África do Sul. A partir de 1982, foi realizado estudo para estabelecer um método de dimensionamento de pavimentos sujeitos a um baixo volume de tráfego, com base nas informações obtidas com o CPD (BERTI, 2005).

O equipamento de CPD de acordo com Jordão (2009, p. 33) mostra na Figura 7 que:

é constituído de uma haste de aço de 20 mm de diâmetro, contendo em sua extremidade uma ponta cônica de aço temperado com 30° de inclinação, o que o torna com o diâmetro ligeiramente maior que o da haste para assegurar que a resistência à penetração seja exercida apenas pelo cone, de um martelo correção de 8 kg de massa, guiado pela haste, que cai de uma altura de 575 mm e de uma régua graduada que permanece apoiada à superfície e paralela à haste de sustentação do equipamento e que mede a penetração do cone, em termos de profundidade.

Figura 7: (a) Partes que constituem o Cone de Penetração Dinâmica; (b) Cone de Penetração Dinâmica completa.



Fonte: Jordão (2009)

Atualmente existem dois tipos de pontas cônicas, com 30° e 60°, a maioria dos equipamentos de penetração dinâmica possuem um martelo deslizante de 8 kg, aproximadamente 78 N.

PROCEDIMENTO DE ENSAIO:

O ensaio de CPD é baseada na norma internacional ASTM D 6951(2003), e é executado com o auxílio de duas pessoas. O comprimento em milímetros que a lança penetra no solo, em função de um determinado número de golpes, é medido em uma régua graduada, porém alguns equipamentos não possuem a mesma. Os resultados são anotados em uma planilha onde indica a profundidade versus o número de golpes aplicados. O CPD foi projetado para penetrar até uma profundidade média de 800 mm ou, quando uma extensão da haste é fixada, pode atingir uma profundidade de 1.200 mm. Kleyn, Maree e Savage (1982), relata que os materiais localizados em profundidades superiores a este valor são pouco interferidos pela ação das cargas do tráfego.

De acordo com Herrick e Jones (2001 *apud* Guedes, 2008, p. 25):

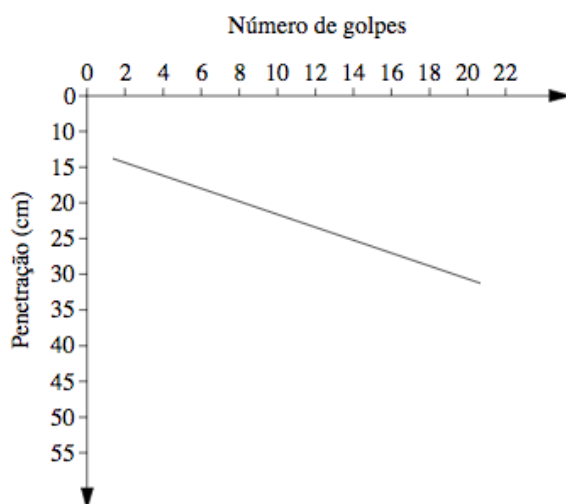
As medidas do cone de penetração podem ser expressas como o número de golpes por milímetro de penetração ou como a resistência média do solo por profundidade do solo penetrado. Esta aproximação não supõe uniformidade do solo, isto gera uma

resistência média através da profundidade penetrada pelo cone. Estes números médios são mais informativos para os solos, os quais são relativamente uniformes dentro do avanço na profundidade penetrada a cada golpe.

Segundo Trichês e Cardoso (1999), a primeira leitura de penetração do CPD é sempre desconsiderada, pois, no primeiro golpe, a superfície de contato entre o cone e o solo não é a mesma dos golpes posteriores, em face das distribuições de pressões induzidas pelo ensaio. No cálculo da razão de penetração não se deve levar em consideração o deslocamento do cone correspondente ao primeiro golpe.

Com os valores das leituras e o número de golpes é possível plotar uma curva no gráfico cartesiano, onde o número de golpes é lançado no eixo das abscissas, enquanto a penetração, no eixo das ordenadas. A curva CPD obtida representa o número de golpes para se alcançar uma dada profundidade, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8: Gráfico do CPD



Fonte: Guedes (2008)

O índice de penetração o qual representa a resistência “*in situ*” do pavimento pode ser expressa através da Equação 2:

$$CDP = \frac{\text{Profundidade}}{\text{Número de Golpes}} \quad (2)$$

A inclinação da curva muda dependendo do tipo de material que constitui a camada do pavimento, ou as suas condições de umidade e densidade, quando verticalizada indica materiais com menor capacidade de suporte e, por sua vez, quanto mais próxima da horizontal,

maior será a sua resistência. De acordo com Trichês e Cardoso (1999), a diferença das cotas entre as duas mudanças de inclinação representa a espessura da camada atravessada.

As principais vantagens da utilização do CPD são:

- Fácil manuseio e transporte;
- Não necessita grande movimentação de terra, sendo caracterizado como um ensaio não-destrutivo;
- Simples execução, realizado por apenas dois operadores;
- Tanto o ensaio quanto a sua análise, podem ser conduzidos por pessoal com treinamento;
- Economia em relação ao custo, comparado a outros equipamentos para realização de ensaios “*in situ*”.

Há também vários trabalhos em relação a utilização do CPD como:

- GUEDES, S. B. Estudo da Viabilidade Técnica do Cone de Penetração Dinâmica (CPD), do Cone de Penetração Estática (CPE) e do Penetrômetro Panda no Dimensionamento de Pavimentos Urbanos;
- MELO, H. B. Aplicação do Cone de Penetração Dinâmica (CPD), como alternativa para Fundações Rasas;
- JORDÃO, H. P. Contribuição ao Projeto de Pavimentos Urbanos de Baixo Volume de Tráfego, através da utilização do Cone de Penetração Dinâmica (CPD).

CAPÍTULO 3

3.1 METODOLOGIA

3.1.1 Tipo de Estudo e Local da Pesquisa

Para o desenvolvimento da proposta deste trabalho foram realizados os ensaios de Teor de Umidade, Proctor e Cone de Penetração Dinâmico, todos no laboratório do Centro Universitário da Faculdade Assis Gurgacz (FAG).

3.1.2 Caracterização da Amostra

Para a obtenção de dados necessários para se desenvolver a proposta de trabalho, foram utilizados, três cavas que já estão executadas no Campo Experimental de Engenharia da FAG (Figura 9), para a execução dos ensaios foram coletadas aproximadamente 30 kg de amostras e foram realizados ensaios de Proctor semelhantes.

O número de cavas foi escolhido para garantir uma média entre os resultados obtidos, mesmo que a distância entre eles seja pequena e o solo de características idênticas.

Figura 9: Localização



Fonte: Google Maps (2017)

Segundo Zen (2016), para o solo do Campo Experimental de Engenharia da FAG, conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), identificou-se a plasticidade do solo, comportamento, que resultou em CL (solos argilosos de baixa compressibilidade) para o primeiro metro. Entretanto para as demais profundidades resultou em CH (solos argilosos muito compressíveis).

Conforme Zen (2016, p. 77) a classificação do solo conforme o Sistema de Classificação Rodoviário (TBR):

É classificado como A-7-6, que o determinada como argila siltosa medianamente plástica com pouco ou nenhum material grosso, que inclui material com elevado índice de plasticidade em relação limite de liquidez, estando sujeito a elevadas mudanças de volume. Conclui-se que a utilização ou não de defloculante não representa grande interferência na classificação pelos sistemas rodoviários e unificado, porém influência muito na classificação através da curva granulométrica e consequentemente pode levar a erros ao se desenvolver projetos e realizar dimensionamento de fundações. As diferenças apresentadas também confirmam as afirmações de que o solo de Cascavel-PR é laterítico, comprovando que realmente há cimentação entre partículas e que estas são efetivamente “quebradas” através da utilização de defloculante durante o ensaio de sedimentação.

Na Tabela 4, pode-se observar os valores médios obtidos por camadas.

Tabela 4: Valores médios por camadas

VALORES MÉDIOS	CAMADA 1 1m a 9m	CAMADA 2 10m a 15m
W (%)	38,96	58,04
LL (%)	53,11	59,00
LP (%)	38,22	42,00
IP (%)	14,89	17,33
Argila (%)	70,07	56,47
Silte (%)	25,26	34,63
Areia (%)	4,67	8,90
Pedregulho (%)	0,00	0,00
Massa Específica do Sólidos (KN/m³)	26,69	27,05
Consistência	Muito mole a Média	Rija a Dura
Peso específico natural (KN/m³)	16,68	16,16
Índice de vazios (e)	1,22	1,66

Fonte: Zen (2016)

3.1.3 Coleta de Dados

Os dados foram coletados no próprio campus do Centro Universitário Assis Gurgacz através do método citado acima, realizadas no dia 20/03/17 (Figura 10). Para a retirada do

material do poço de inspeção que já se encontrava escavado, inicialmente foi realizado uma breve limpeza do local, utilizando equipamentos comuns, tendo em vista que o mesmo não era utilizado a algum tempo grande quantidade de folhagem e grama encobriu o local. Após a limpeza foi retirada certa quantidade de terra fofa que se desprende das laterais do poço escavado, evitando assim resultados inconclusivos para os ensaios. Retirou-se do local cerca de 10 kg de amostra de cada cava (Figura 11) para a execução dos ensaios de Proctor, Cone de Penetração Dinâmico (CPD) e ensaio de Teor de Umidade.

Figura 10: Cavas executados



Fonte: Autor (2017)

Figura 11: Material coletado para execução dos ensaios



Fonte: Autor (2017)

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

3.2.1 Proctor

Com a amostra de solo retirada, todo o material coletado nas cavas foram acomodados em bandeja e colocado em estufa elétrica, controlada automaticamente por termostato, capaz de manter a temperatura entre $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, por cerca de 48 horas (Figura 12). Após a secagem, rapidamente foi efetuado uma pesagem para que a amostra não adquirisse umidade do ambiente.

Figura 12: Material coletado acomodado em bandejas e separados para ir à estufa



Fonte: Autor (2017)

Para início do ensaio, foi utilizado cerca de 10 kg de material preparada de acordo com a NBR 9895/87, sendo a mesma acomodada em nova bandeja e destorroada com auxílio de soquete com ponta emborrachada, somente escarificando o material contra a bandeja, sem efetuar pancadas (Figura 13). Após destorroar o material, mesmo tratando-se de um solo argiloso e de granulometria pequena, a preparação da amostra foi executada de acordo com a NBR 6457/86, passando pela peneira de 4,75 mm. Como esperado, cerca de 99% da amostra utilizada passou pela peneira (Figura 14).

Figura 13: Destorroamento do material com auxílio de soquete.



Fonte: Autor (2017)

Figura 14: Material passante na peneira 4,75mm



Fonte: Autor (2017)

No primeiro ensaio executado, utilizou-se os 10 kg de material destorroados, partindo de um teor de umidade de aproximadamente 15%. A confecção dos corpos de prova seguiu os seguintes passos:

a) Fixou-se o molde cilíndrico à sua base, acoplando o cilindro complementar e apoiando o conjunto em uma base rígida. Foi necessário, colocar uma folha de papel filtro com diâmetro igual ao molde utilizado, de modo a evitar a aderência do solo compactado com a superfície metálica da base;

b) Após foi pego a amostra preparada para ensaios com reuso de material de acordo com a NBR 6457/86;

c) Na bandeja metálica, com o auxílio da proveta de vidro, foi adicionado água destilada, gradativamente e revolvendo continuamente o material, de forma a se obter o teor de umidade em torno de 5% abaixo da umidade ótima presumível;

d) Após completa homogeneização do material, procedeu-se à sua compactação, atendendo-se ao soquete pequeno com massa de 2,5 kg e energia de compactação normal com 26 golpes por camada. Os golpes do soquete foram aplicados perpendicularmente e distribuídos uniformemente sobre a superfície de cada camada, sendo que as alturas das camadas compactadas tiveram resultados aproximadamente iguais, com cerca de 30,5 cm. A compactação de cada camada foi precedida de uma ligeira escarificação da camada subjacente (Figura 15);

e) Após a compactação da última camada, retirou-se o cilindro complementar depois de escarificar o material em contato com a parede do mesmo, com auxílio de espátula. Houve um excesso de, no máximo, 10 mm de solo compactado acima do molde que foi removido e rasado com auxílio de régua biselada. Feito isso, retirou-se o molde cilíndrico de sua base.

f) Foi pesado o conjunto, com resolução de 1 g, e, por subtração do peso do molde cilíndrico, obteve-se o peso úmido do solo compactado, P_h ;

g) Com o auxílio do extrator, extraiu-se o corpo-de-prova do molde (Figura 16) e do centro do mesmo, retirou-se uma amostra para determinação da umidade, h , de acordo com a NBR 6457;

h) Novamente foi destorreado o material, com o auxílio da desempenadeira e da espátula, até que passe integralmente na peneira 4,8 mm;

i) Foi juntado o material assim obtido com o remanescente na bandeja e adicionado água destilada, revolvendo o material, de forma a incrementar o teor de umidade de aproximadamente 5%;

Figura 15: Corpo de Prova sendo preparado para compactação com soquete



Fonte: Autor (2017)

Figura 16: Corpo de Prova sendo extraído com auxílio do extrator



Fonte: Autor (2017)

Após a confecção, pesagem (Figura 17) e retirada de amostra de cada corpo de prova, como descrito nos passos acima, o solo compactado era destorreado e revolvido novamente ao solo da bandeja. Antes da execução do segundo, terceiro e quarto corpo de prova, adicionou-se 150 ml de água, de modo a incrementar a umidade do solo em aproximadamente 5%. A adição de água para a execução do quinto corpo de prova foi efetuada, porém a amostra de solo ficou extremamente saturada, impossibilitando a continuação dos ensaios. Feito os procedimentos acima é necessário determinar a massa específica natural do corpo de prova e o teor de umidade. Calculando o peso específico aparente úmido, teor de umidade de uma amostra do interior do CP e o peso específico aparente seco.

Figura 17: Corpo de Prova sendo pesado



Fonte: Autor (2017)

Experimentalmente, foi possível constatar que a adição de água a um solo seco facilita a sua compactação, ou seja, cada vez que se adiciona água a esse solo pouco úmido, a densidade final do material compactado aumenta. Entretanto, isto não ocorre indefinidamente. Constatase que o acréscimo de água tem um efeito benéfico enquanto não se alcança determinado teor de umidade, o qual é chamado de umidade ótima (w_o). Quando a adição de água conduz a umidades muito elevadas, a umidade ótima passa a ter o processo inverso, reduzindo assim a densidade do material compactado com o acréscimo de umidade.

Este processo foi repetido para os níveis de energia intermediário e modificado, porém conforme solicitação da norma técnica foi mantido o cilindro pequeno, mas utilizado soquete grande. Ressalta-se também que o número de camadas a ser compactada e o número de golpes com o soquete muda respectivamente para ambos os ensaios.

3.2.2 Cone de Penetração Dinâmico (CPD)

Foram efetuados quatro ensaios de CPD, todos no mesmo dia dos ensaios de Proctor com a amostra sendo moldada no CP no mesmo momento em que foi realizado o CP do experimento de Proctor (Figura 18). Este ensaio foi realizado com auxílio do laboratorista para todos os corpos de prova moldados. Basicamente o ensaio consiste em um primeiro golpe, desconsiderado na soma da profundidade atingida, seguido de outros nove, finalizando o ensaio.

Devido ao fato de o ensaio ter sido realizado em laboratório e não em campo, algumas adaptações tiveram de ser efetuadas. Como não há espaço entre a chapa da base do equipamento e o corpo de prova moldado, foi elevado o equipamento utilizando quatro corpos de prova do laboratório de concreto, fazendo assim com que o molde do corpo de prova do ensaio de Proctor, ficasse devidamente centralizado com a ponteira metálica do equipamento, que por sua vez também estático para a execução do ensaio (Figura 19).

Figura 18: Corpos de Prova sendo moldados simultaneamente



Fonte: Autor (2017)

Figura 19: Corpo de Prova sendo centralizado por meio de travamento.



Fonte: Autor (2017)

Estando as devidas adaptações em conforme, montou-se a parte superior do equipamento, composta pelo martelo e seu guia que limita a altura de queda. Devido à falta de régua graduada, após o primeiro golpe, media-se a distância entre a haste que desce em direção ao CP e a base que recebe o golpe do martelo, ligados pela barra. Uma nova medida era feita após a execução dos outros nove golpes (Figura 20). O resultado era a diferença da primeira com a segunda, sendo este a profundidade de penetração da ponta cônica.

Figura 20: Ensaio CPD sendo executado



Fonte: Autor (2017)

Este processo foi repetido para os níveis de energia intermediário e modificado, para título de comparação da penetração no solo com a máxima massa específica seca (γ_{dmax}).

CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1.1 Disposições Gerais e Coleta das Amostras

Os resultados foram obtidos por meio da realização de CPD, ensaio de Proctor e da coleta de amostras deformadas em cavas, na região do Campo Experimental de Engenharia da FAG (CEEF). Foram coletadas cerca de 30 kg do primeiro metro.

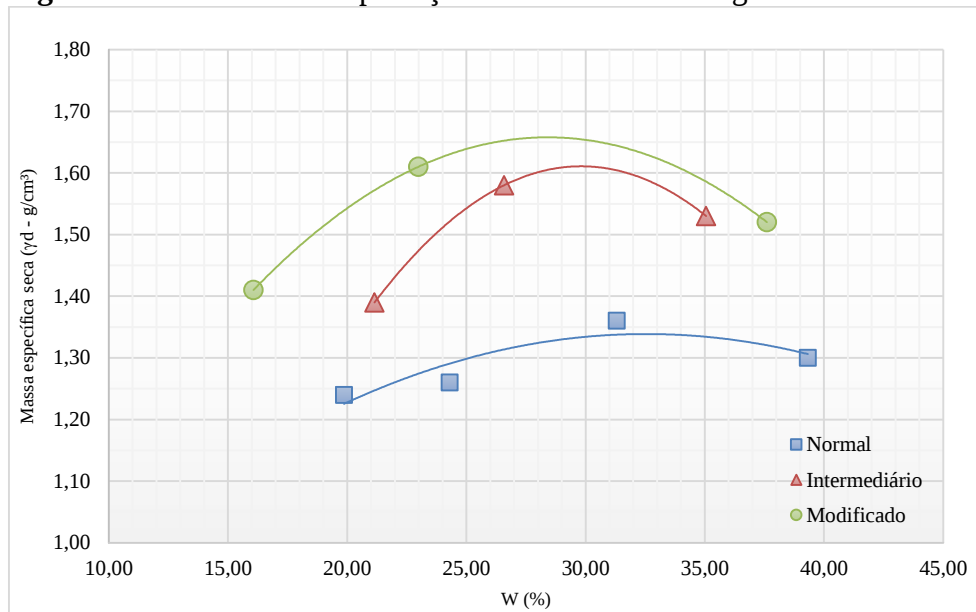
Conforme foi realizado o ensaio de Proctor, que tem como objetivo determinar a Umidade Ótima de compactação e o Peso Específico Aparente Seco máximo, foram realizados simultaneamente ensaios com o Cone de Penetração Dinâmica (CPD), a fim de determinar taxas de penetração e consequentemente estabelecer relações entre o grau de compactação e o ensaio de CPD para os três níveis de energia: Proctor normal, intermediário e modificado.

4.2 ENSAIO DE PROCTOR

Quando se realiza a compactação de um solo, sob diferentes condições de umidade e para níveis de energia diferentes, observa-se que a umidade aumenta durante todo o ensaio, enquanto que a massa específica seca (γ_d) aumenta até determinado ponto, devido a redução do excesso de água presente na amostra. Serão apresentadas na Figura 21 as curvas de compactação para os três níveis de energia (Normal, Intermediário e Modificado) para o mesmo solo. O solo utilizado no ensaio foi retirado do primeiro metro de cavas escavadas no Campo Experimental de Engenharia da FAG (CEEF).

Para o ensaio de Proctor Normal, utilizou-se o cilindro pequeno e o soquete pequeno. Para os demais níveis de energia foi utilizado as combinações de cilindro pequeno mais soquete grande, conforme a NBR 7182/86 sugere.

As curvas de compactação apresentaram resultados conforme esperados, com massa específica seca máxima com o valor crescente entre as energias de compactação, e o teor de umidade ótimo com valor decrescente conforme aumentava-se a energia de compactação. (Anexos 1, 2 e 3).

Figura 21: Curvas de Compactação com diferentes energias

Fonte: Autor (2017)

Como pode ser verificado pelo Figura 21 o comportamento das amostras mediante os diferentes níveis de energia apresentou dados conforme esperado e apontado pela Figura 2, com curvas sempre mais à esquerda e acima conforme aumenta-se a energia de compactação.

É possível verificar na Figura 21 que para o ensaio de Proctor Normal a massa específica máxima obtida foi de 1,39 g/cm³, no teor de umidade ótimo de 31,50%. Já para a energia Intermediário determinou-se a massa específica máxima para 1,58g/cm³ e seu teor de umidade ótimo de 30,00%. Por fim, para a energia Modificado obteve-se a massa específica máxima de 1,62g/cm³ e seu teor de umidade ótimo de 28,00%.

Obteve-se o Grau de Compactação (GC) pela penetração realizada pelo CPD, em outras palavras, sem ter que fazer ensaio de umidade e massa específica natural já é possível obter o GC do solo somente sabendo qual é a energia de compactação empregada.

4.3 ENSAIO DE CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA (CPD)

Com os ensaios de Proctor Normal, Intermediário e modificado, obteve-se a máxima massa específica seca, que corresponde a maior resistência do solo. Em sequência aos ensaios de Proctor, foi iniciado o ensaio do cone de penetração dinâmica (CPD), utilizado para determinação da resistência de solos e controle de execução de camadas de revestimento de pavimentos. O CPD não tem velocidade constante de penetração no solo, bem como não é

necessária a aplicação de forças contínuas. Basicamente a penetração no solo, depende da energia aplicada, da geometria da ponta, e da resistência à penetração do solo.

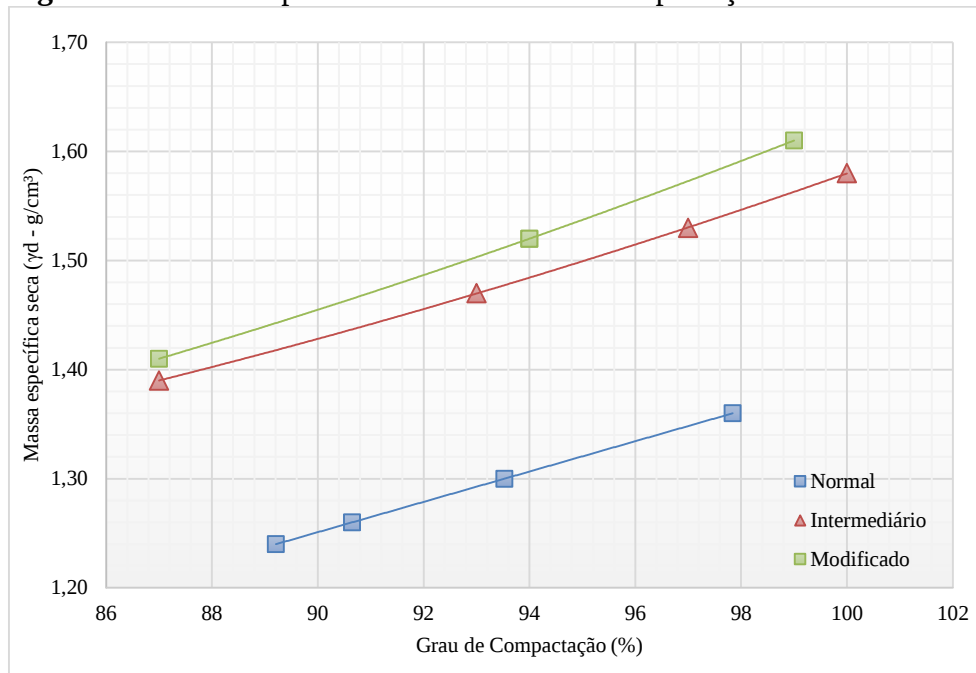
Para a execução do ensaio do Cone de Penetração Dinâmica, foi necessário o auxílio do laboratorista, pois o equipamento exige no mínimo duas pessoas para garantir o correto nivelamento da ponta cônica do CPD, com o centro do corpo de provas, sendo assim necessário segurar a base até o acerto de prumo do martelo.

Para cada corpo de prova realizado para o ensaio de Proctor, foi feito um ensaio de CPD no corpo de prova, afim de verificar a penetração, e com isso foram correlacionados os valores de penetração pelo CPD e o grau de compactação do corpo de prova compactada, com relação ao grau de compactação ótimo.

O índice de Penetração, em mm/golpe, foi obtido medindo-se a distância entre a haste que desce em direção ao CP e a base que recebe o golpe do martelo, ligados pela barra. O número de golpes adotado para a realização deste trabalho foi de 9 (nove), lembrando que no total foram 10 (dez) golpes, porém o primeiro não foi contabilizado nos cálculos. Durante a execução dos ensaios, foi possível verificar que em diferentes níveis de energia de compactação e número de camadas conforme a NBR 7182/86 estipula para o ensaio de Proctor, houve uma maior resistência a penetração. Outro fator observado conforme a Tabela 5 é o teor de umidade, sendo que quanto maior é a umidade apresentada no solo, maior é o índice de penetração.

O valor de penetração apresentado é o valor médio de penetração em mm/golpe, considerando os últimos 9 (nove) golpes. O GC é o grau de compactação e é dado pela relação entre a massa específica seca determinada no ensaio pela massa específica máxima determinada pelo ensaio $\times 100$.

A Figura 22 mostra o comportamento da massa específica seca de acordo com o grau de compactação empregado no corpo de prova ou no solo, para os 3 níveis de energia nos ensaios de Proctor. É interessante observar os valores de massa específica seca que fornecem 95% ou mais de GC para cada energia. Nota-se também que nos ensaios intermediário e modificado, os valores da massa específica encontrados são relativamente próximos devido a energia empregada no ensaio.

Figura 22: Massa Específica Seca x Grau de Compactação

Fonte: Autor (2017)

Com os resultados dos ensaios conforme na Tabela 5, foi possível obter as relações entre os ensaios de Proctor com diferentes energias e a penetração encontrada no CPD, que resultou nas equações de grau de compactação (GC).

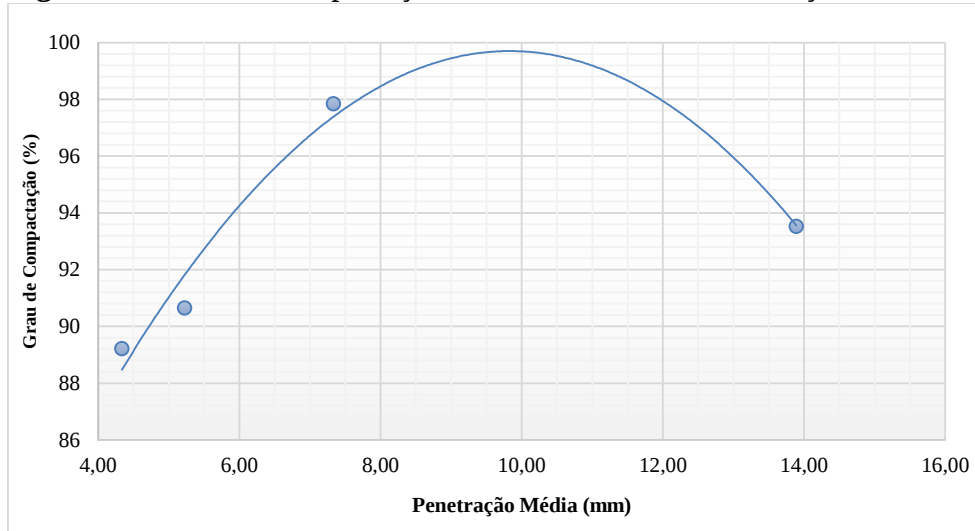
Tabela 5: Ensaio de Proctor x Ensaio CPD

Ensaio Normal			
Yd (g/cm³)	W (%)	GC (%)	Penetração (mm)
1,24	19,87	89	4,81
1,26	24,30	91	5,80
1,36	31,31	98	8,14
1,30	39,32	94	15,43
Yd _{Máx} (g/cm³)		W _{ótimo} (%)	
1,39		31,50	
Ensaio Intermediário			
Yd (g/cm³)	W (%)	GC (%)	Penetração (mm)
1,39	21,15	88	4,20
1,58	26,58	100	5,55
1,53	35,06	97	15,43
Yd _{Máx} (g/cm³)		W _{ótimo} (%)	
1,58		30	
Ensaio Modificado			
Yd (g/cm³)	W (%)	GC (%)	Penetração (mm)
1,41	16,07	87	3,45
1,61	22,99	99	4,57
1,52	37,61	94	7,16
Yd _{Máx} (g/cm³)		W _{ótimo} (%)	
1.62		28	

Fonte: Autor (2017)

Para os três ensaios de Proctor: Normal, Intermediário e Modificado obteve-se o grau de compactação (%), onde no campo CPD é inserida a penetração pelo equipamento em mm/golpe, para os 9 (nove) últimos golpes, e a partir dela comparando com os valores obtidos pelo ensaio CPD chegou-se nas equações, destaca-se que nos três ensaios obteve-se valores de grau de compactação acima de 95%, as quais são almejadas em campo.

Figura 23: Grau de Compactação – Proctor Normal x Penetração

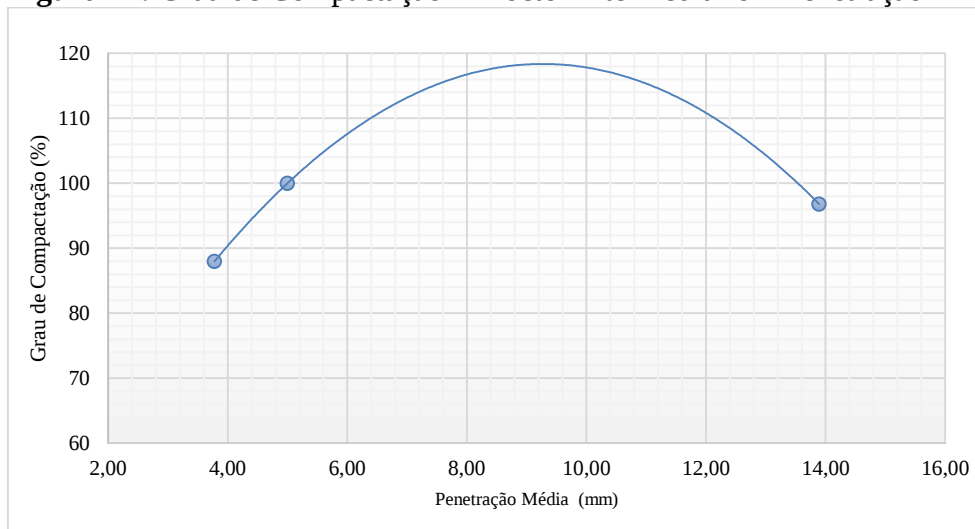


Fonte: Autor (2017)

Conforme a curva do ensaio de Proctor Normal x Penetração obteve-se a Equação 3:

$$GC (\%) = -0,3722CPD^2 + 7,3158CPD + 63,755 \quad (R^2 = 0,9516) \quad (3)$$

Figura 24: Grau de Compactação – Proctor Intermediário x Penetração

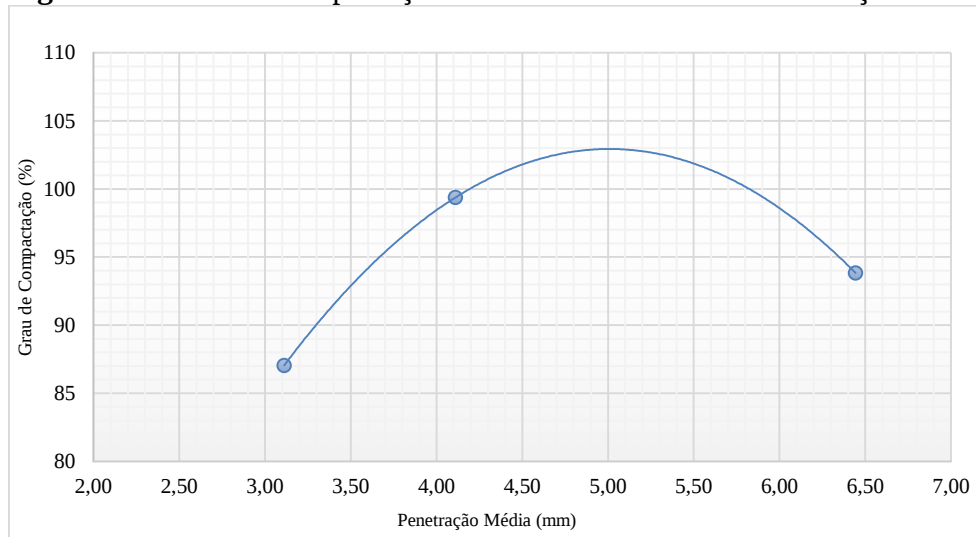


Fonte: Autor (2017)

Para o ensaio de Proctor Intermediário x Penetração foi determinada a curva através da correlação entre os dados, gerando a Equação 4:

$$GC (\%) = -1,0083CPD^2 + 18,689CPD + 31,76 \quad (R^2 = 1) \quad (4)$$

Figura 25: Grau de Compactação – Proctor Modificado x Penetração



Fonte: Autor (2017)

Como no ensaio de Proctor Intermediário, no Proctor Modificado x Penetração foi determinada a curva utilizando a mesma correlação, onde obteve-se a Equação 5.

$$GC (\%) = -4,418CPD^2 + 44,253CPD - 7,8784 \quad (R^2 = 1) \quad (5)$$

Verificou-se que os resultados aferidos em laboratório, podem ser considerados satisfatórios, entretanto é válido ressaltar que mais ensaios devem ser realizados para conferência dos resultados e validação das fórmulas obtidas. O uso das mesmas deve ser realizado com cautela no cotidiano prático, devido às incertezas envolvidas entre os meios experimentais e práticos.

É válido ressaltar algumas vantagens do CPD, como fácil manuseio e transporte, podendo ser utilizado por apenas dois operadores. Também não necessita grande movimentação de terra, e possui baixo custo se comparado a outros equipamentos para realização em ensaios “*in situ*”.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo, analisar o grau de compactação através de ensaio de cone de penetração dinâmica (CPD), por meio de ensaios realizados em laboratório do Campo Experimental do Centro Universitário Assis Gurgacz (FAG), localizado no município de Cascavel/PR. Os ensaios foram conduzidos através de amostras deformadas coletadas de solo do primeiro metro do campo experimental, que em sequência foram submetidas a ensaios de Proctor e CPD em para diferentes níveis de compactação.

Primeiramente através dos ensaios de Proctor para cada nível de energia chegou-se a máxima massa específica seca ($\gamma_{d_{máx}}$) e teor de umidade ótimo (w_o), sendo que para o ensaio normal, obteve-se a massa específica seca máxima ($\gamma_{d_{máx}}$) 1,39 g/cm³ e teor de umidade 31,50%. Para o nível Intermediário a massa específica seca máxima ($\gamma_{d_{máx}}$) 1,58 g/cm³ e teor de umidade 30,00% e para o nível de energia Modificado a massa específica seca máxima ($\gamma_{d_{máx}}$) 1,62 g/cm³ e teor de umidade 28,00%.

Para cada corpo de prova realizado para o ensaio de Proctor, foi feito um ensaio de CPD no corpo de prova, afim de verificar a penetração, e com isso foram correlacionados os valores de penetração pelo CPD (mm/golpe) e o grau de compactação do corpo de prova compactada.

Em suma foi possível identificar o Grau de Compactação do solo por meio da correlação entre o ensaio de Proctor e o Cone de Penetração Dinâmica, surgindo as três equações para os diferentes níveis de energia, ou seja, sem ter que fazer o ensaio de umidade e massa específica natural, já é possível obter o Grau de Compactação somente sabendo qual é a energia de compactação empregada. Outro ponto positivo é a facilidade de se utilizar o equipamento de CPD, ao contrário dos ensaios de campo para determinar o grau de compactação. Nas equações levam em consideração a umidade do solo local necessitando apenas saber a energia empregada no serviço de compactação.

Ressalta-se ainda que o valor de entrada do ensaio do CPD deve ser em mm/golpe, contabilizado nos nove últimos golpes, ou seja, pega-se o valor total da penetração dos nove golpes em milímetros e divide-se por nove.

Conclui-se que os resultados aferidos em laboratório, podem ser considerados satisfatórios, todavia o estudo foi realizado com solo laterítico e superficial do campo Experimental do Centro Universitário Assis Gurgacz (FAG) e, portanto passível de erros e incertezas, podendo apresentar valores diferentes caso seja aplicado em solos que não

apresentam a mesma composição, portanto sua utilização na prática deve ser realizada com cautela.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através dos resultados obtidos neste trabalho, sugere-se a execução dos ensaios de Proctor e Cone de Penetração Dinâmica (CPD) em outras regiões com características diferentes do solo de Cascavel – PR. Também é interessante utilizar além do CPD o Cone de Penetração Estático (CPE), com objetivo de levantar dados suficientes para elaboração de correlações entre os dois equipamentos, possibilitando aferir e elaborar outros modelos matemáticos de maneira satisfatória para todas as situações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, T-222-78. **Designation:** FM 5-527. Method of Test for Nonrepetitive Static Plate Load Test of Soils and Flexible Pavement components, Florida, 2000.

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

_____. **NBR 6502: Rochas e solos** - Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 46457. Amostras de solo** – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização. Rio de Janeiro, 1996.

ALVES, A. B. C. **Avaliação da Capacidade de Suporte e Controle Tecnológico de Execução da Camada Final de Terraplenagem Utilizando o Penetrômetro Dinâmico de Cone.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

AMARAL, F. C. F. **Previsão da Capacidade de Suporte de Areias Médias e Finas Uniformes em Obras Viárias com o Emprego do Ensaio DCP.** Mestrado em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica – Área de Infra-Estrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.

AMINI, F. **Potencial Applications of Dynamic and Static Cone Penetrometers in Pavement Design and Construction. Final Report.** Department of Civil Engineering Jackson state University in Cooperation with Mississippi Department of Transportation and the U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. 2003. Disponível em: <<http://www.mdot.state.ms.us/research/pdf/DynConPn.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2016.

AOKI, N. Ensaio Holandês de Penetração. Curso de atualização em fundações. Centro de Produção da UEG (CEPUEG), 1973.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação Asfáltica:** formação básica de engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 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 (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Campinas, 2005.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas aplicações.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v. 3, 1987.

CARDOSO, S. S. O. **Determinação do teor de umidade.** 2014. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/3353053/relatorio-determinacao-do-teor-de-umidade>>. Acesso em 25 set. 2016.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME – 049/94. **Solos** – Determinação do Índice de Suporte Califórnia, 1994.

_____. DNER-ME 213/94. **Solos - determinação do teor de umidade**. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me213-94.pdf>>. Acesso em: 10 Out. 2016.

_____. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 1996.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

ESCOLA ENGENHARIA. **Compactação de solos**. 2013. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/compactacao-de-solos/>>. Acesso em: 20 set. 2016.

FREIRE, É. P.; RODRIGUES, G. E.; SOARES, Y. V. 1999. **Estudo do Grau de Colapsividade da Argila Laterítica de Alfenas**. Disponível em: <http://www.unifenas.br/pesquisa/download/artigosrev1_99/pag81-92.pdf>. Acesso em: 22 set. 2016.

FSP – Faculdade Sudoeste Paulista – Engenharia Civil. **Unidade 2 - Índices Físicos e retirada de amostras**. 2013. Disponível em: <<https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2013/03/unidade-2-c3adndices-fc3adsicos-e-retirada-de-amostras.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2016.

GOOGLE MAPS. Campo Experimental de Engenharia da FAG. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/>>. Acesso em: 20 mai. 2017.

GUEDES, S. B. **Estudo da Viabilidade Técnica do Cone de Penetração Dinâmica (CPD), do Cone de Penetração Estática (CPE) e do Penetrômetro Panda no Dimensionamento de Pavimentos Urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Departamento de Engenharia Civil. Campina Grande, 2008.

JORDÃO, H. P. **Contribuição ao projeto de pavimentos urbanos de baixo volume de tráfego, através da utilização do cone de penetração dinâmica**. 2009. Disponível em: <http://www.coenge.ufcg.edu.br/publicacoes/Public_363.pdf>. Acesso em: 20 set. 2016.

KLEYN, E. G.; MAREE, J. H.; SAVAGE, P. F. The Application of a Portable Pavement Dynamic Cone Penetrometer to Determine in situ Bearing Properties of Road Pavement Layers and Sgrades in South Africa. In: **Proceedings of Second European Symposium on Penetration Testing**, Amsterdam, p 277-281, 1982.

MACIEL FILHO, C. L. **Introdução a Geologia de Engenharia**. 2. ed. Santa Maria: Editora da UFSM, Brasília. 1994.

MASSAD, F. **Obras de terra: Curso básico de Geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

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

SANTOS, J. A. **Compactação** – Elementos Teóricos. 2008. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/~jaime/Compacta_T.pdf>. Acesso em: 24 set. 2016.

SCHNAID, F. **Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. Oficina de Textos. São Paulo-SP, 2000.

SILVA JÚNIOR, F.A. **Cone de Penetração Dinâmica (DCP): Uma Alternativa ao Dimensionamento de Pavimentos Urbanos**. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Campina Grande, 2005.

TRICHÊS, G.; CARDOSO, A. B. Avaliação da Capacidade de Aterros e Subleito de Rodovias Utilizando o Penetrômetro Dinâmico de Cone e a Viga Benkelman. In: **Transporte em Transformação**, IV. Trabalhos Vencedores do Prêmio CNT – Produção Acadêmica. Makron Books, p. 35-49, 1999.

UFJF - UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. **Capítulo 10 – Elementos sobre solos**. 2009. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/Geologia-Cap10a.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2016.

ZEN, B, A. B. **Caracterização Geotécnica do Subsolo do Campo Experimental do Centro Acadêmico da FAG em Cascavel/PR**. 2016, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade Assis Gurgacz, Cascavel/Pr.

ANEXOS

ANEXO 1 - PROCTOR NORMAL

TABELA TEOR DE UMIDADE

TEOR DE UMIDADE					
AMOSTRA	1	2	3	4	5
Número Cápsula	1	2	3	4	
Mc+Ms+w (g)	48,80	51,14	41,68	56,26	
Mc+Ms (g)	46,60	48,72	39,93	49,80	
Mc (g)	35,53	38,76	34,34	33,37	0,00
w (%)	19,87	24,30	31,31	39,32	0,00

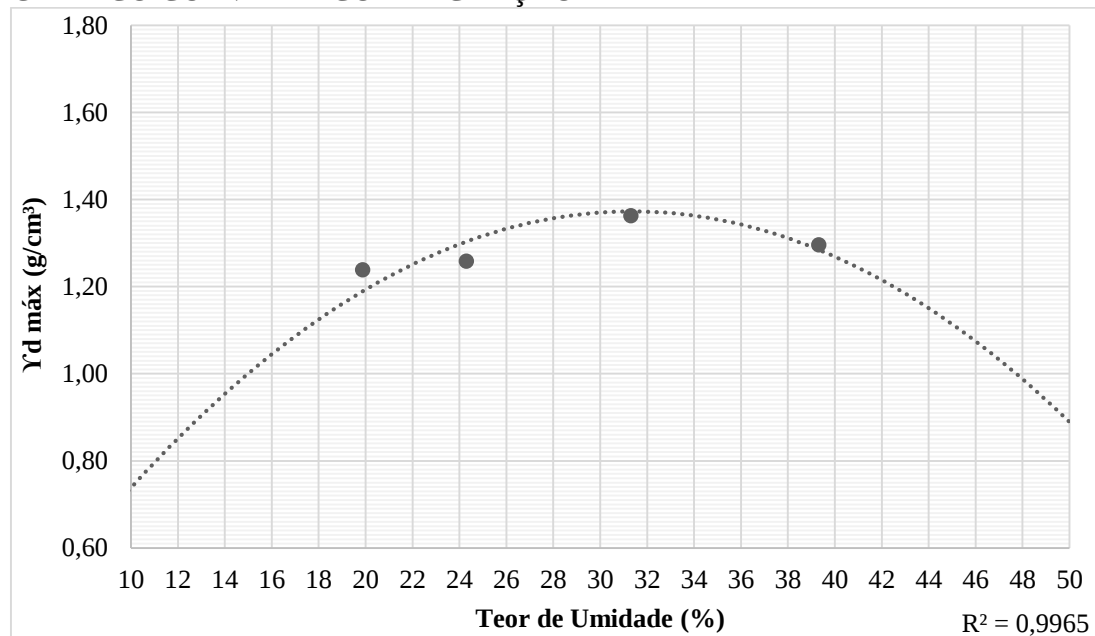
Fonte: Autor (2017)

TABELA PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO

PESO ESPECÍFICO APARENTEMENTE SECO					
Número do Molde	1	1	1	1	1
Altura do Molde (cm)	117 cm	117 cm	117 cm	117 cm	117 cm
Diâmetro do Molde (cm)	102 cm	102 cm	102 cm	102 cm	102 cm
Volume do Molde (cm³)	956	956	956	956	956
Massa Úmida (g)	1420	1495	1711	1726	
Dens. Seca (g/cm³)	1,24	1,26	1,36	1,30	0,00

Fonte: Autor (2017)

GRÁFICO CURVA DE COMPACTAÇÃO



Fonte: Autor (2017)

ANEXO 2 - PROCTOR INTERMEDIÁRIO

TABELA TEOR DE UMIDADE

TEOR DE UMIDADE					
AMOSTRA	1	2	3	4	5
Número Cápsula					
Mc+s+w (g)		54,40	62,80	56,50	
Mc+s (g)		51,10	56,50	51,10	
Mc (g)		35,50	32,80	35,70	
w (%)	0,00	21,15	26,58	35,06	0,00

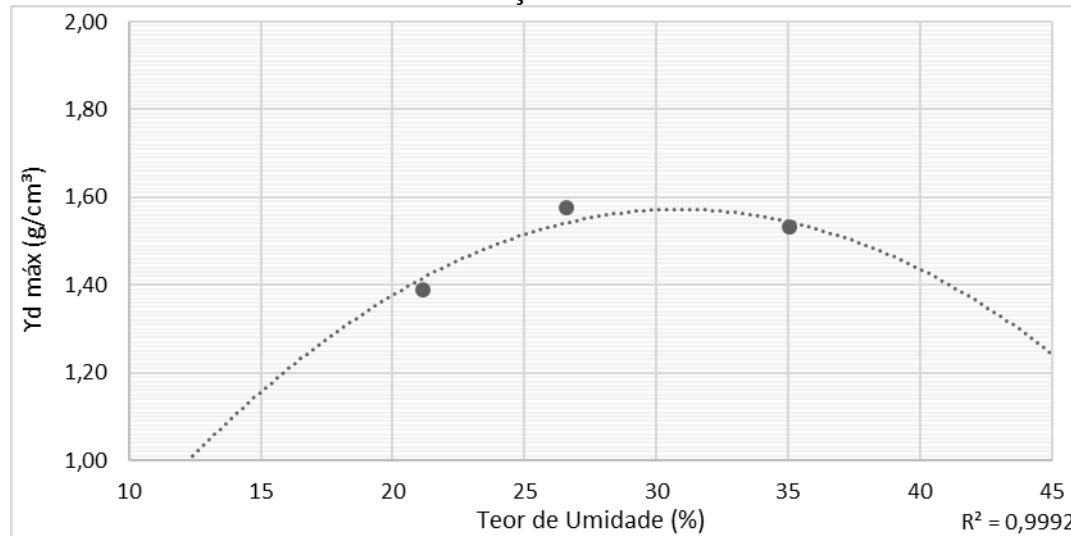
Fonte: Autor (2017)

TABELA PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO

PESO ESPECÍFICO APARENTEMENTE SECO					
Número do Molde	1	1	1	1	1
Altura do Molde (cm)	117 cm	117 cm	117 cm	117 cm	117 cm
Diâmetro do Molde (cm)	102 cm	102 cm	102 cm	102 cm	102 cm
Volume do Molde (cm ³)	956	956	956	956	956
Massa Úmida (g)		1609	1909	1980	
Dens. Seca (g/cm ³)	0,00	1,39	1,58	1,53	0,00

Fonte: Autor (2017)

GRÁFICO CURVA DE COMPACTAÇÃO



Fonte: Autor (2017)

ANEXO 3 - PROCTOR MODIFICADO

TABELA TEOR DE UMIDADE

TEOR DE UMIDADE					
AMOSTRA	1	2	3	4	5
Número Cápsula					
Mc+s+w (g)	50,00	59,00	59,00	65,50	
Mc+s (g)	48,20	54,70	52,00	57,00	
Mc (g)	37,00	36,00	31,00	34,40	
w (%)	16,07	22,99	33,33	37,61	0,00

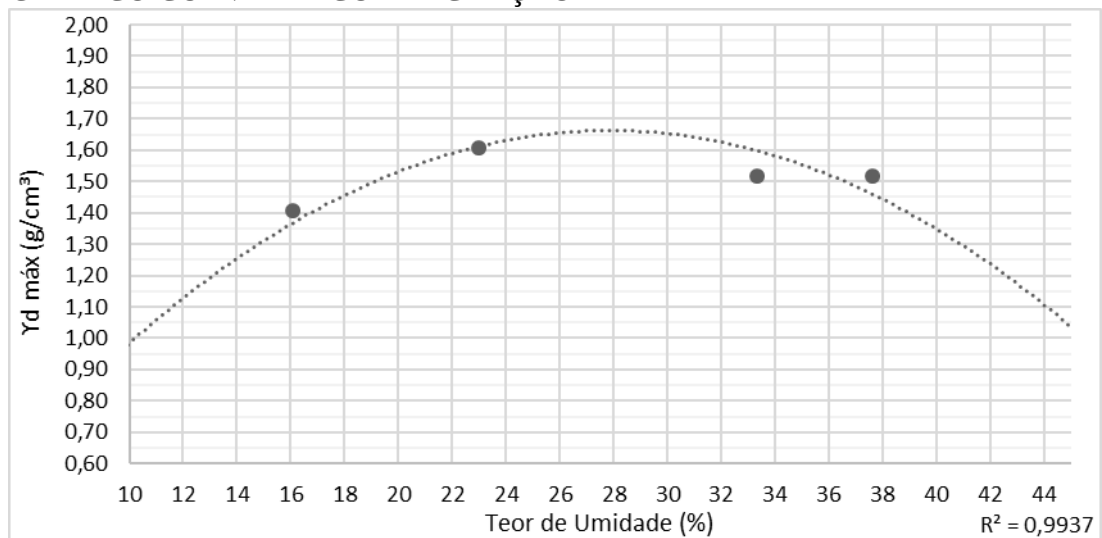
Fonte: Autor (2017)

TABELA PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO

PESO ESPECÍFICO APARENTEMENTE SECO					
Número do Molde	1	1	1	1	1
Altura do Molde (cm)	117 cm	117 cm	117 cm	117 cm	117 cm
Diâmetro do Molde (cm)	102 cm	102 cm	102 cm	102 cm	102 cm
Volume do Molde (cm ³)	956	956	956	956	956
Massa Úmida (g)	1560	1890	1935	1999	
Dens. Seca (g/cm ³)	1,41	1,61	1,52	1,52	0,00

Fonte: Autor (2017)

GRÁFICO CURVA DE COMPACTAÇÃO



Fonte: Autor (2017)