



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**



**COMPACTAÇÃO DE SUBLEITO DE VIAS DE LOTEAMENTO
RESIDENCIAL URBANO. VERIFICAÇÃO DE INFLUÊNCIA DA COTA
DO TERRENO E DO ÍNDICE PLUVIOMÉTRICO.**

DAURY SOUSA DA SILVA FILHO

BELÉM/PA

2023

DAURY SOUSA DA SILVA FILHO

**COMPACTAÇÃO DE SUBLEITO DE VIAS DE LOTEAMENTO
RESIDENCIAL URBANO. VERIFICAÇÃO DE INFLUÊNCIA DA COTA
DO TERRENO E DO ÍNDICE PLUVIOMÉTRICO.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal do Pará - UFPA, como parte
dos requisitos necessários à obtenção do título de
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientadora: Prof^a Dra. Rita de Cássia Monteiro de
Moraes

BELÉM/PA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

- S586c Silva Filho, Daury Sousa da.
Compactação de subleito de vias de loteamento
residencial urbano : Verificação de influência da cota do
terreno e índice pluviométrico / Daury Sousa da Silva Filho. —
2023.
66 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof^a. Dra. Rita de Cássia Monteiro de
Moraes
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia,
Faculdade de Engenharia Civil, Belém, 2023.
1. Subleito. 2. Umidade ótima. 3. Densidade. 4.
Chuva. 5. Topografia. I. Título.

CDD 625.8

DAURY SOUSA DA SILVA FILHO

COMPACTAÇÃO DE SUBLEITO DE VIAS DE LOTEAMENTO RESIDENCIAL URBANO. VERIFICAÇÃO DE INFLUÊNCIA DA COTA DO TERRENO E DO ÍNDICE PLUVIOMÉTRICO.

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal do Pará - UFPA, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Belém, 18/12/2023

Examinadores:

Professora Dra. Rita de Cássia Monteiro de Moraes
Universidade Federal do Pará | UFPA
Orientadora

Professor Dr. Renato Martins das Neves
Universidade Federal do Pará | UFPA
Membro da banca

Professora Dra. Patrícia Bittencourt Tavares das Neves
Universidade Federal do Pará | UFPA
Membro da banca

Conceito: E (Excelente)

DEDICATÓRIA

Aos meus filhos, Athena e Ares, que me
fizeram ver adiante.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha mãe, pelo dom da vida e por seu amor incondicional, apesar de, por vezes eu não ter correspondido como deveria.

Agradeço a meu pai, pelo dom da vida e pelo nome que herdei.

A minha irmã Denyse, que por vezes fez a vez de voz da consciência em seus alertas.

A meu tio Antônio Marino, que considero como meu segundo pai.

A meu primo William, que desde cedo através do exemplo mostrava que caminhos deveriam ser trilhados.

Ao meu tio, Antônio Domingos, por inspirar através do exemplo.

A minha namorada, Mayumi, pela paciência e pelo incentivo.

Ao meu bom e velho amigo, José Lélis, pelos conselhos e pelas incontáveis histórias que sempre trazem uma lição.

A D. Ailda, pela positividade e palavras de incentivo em momentos que fizeram toda a diferença.

A minha orientadora, Prof. Rita de Cássia, pela sua orientação, paciência, disposição em ajudar e pelo seu alto astral, perceptível em uma simples mensagem de bom dia. Mensagens estas que dão esperança mesmo nos momentos nebulosos.

A todo o corpo docente desta casa, UFPA, que me recepcionou e me proporcionou vivências e aprendizados.

A UFPA pelo crescimento pessoal e profissional que promoveu.

“Se uma coisa é difícil para ti, não concluas daí que ela está para além do poder dos mortais. Terás de admitir, pelo contrário, que, se uma coisa é possível e própria para o homem fazer, tem de estar dentro das tuas próprias capacidades.”

Marco Aurélio

RESUMO

Anualmente Belém recebe volume elevado de chuvas, suas condições climática e topográfica ocasionam circunstâncias que proporcionam elevados índices pluviométricos. Dado o marcante aspecto climático da capital paraense, determinadas obras de construção civil têm uma fragilidade específica exposta anualmente no período sazonal chuvoso, são estas, as obras de pavimentação. Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da frequência de chuvas, do volume pluviométrico e da topografia do terreno na densidade e na umidade ótima do subleito de pavimento em concreto asfáltico usinado a quente no empreendimento Bougainville, situado as margens da Av. Augusto Montenegro, região metropolitana de Belém. A metodologia deste trabalho consiste em análise estatística de dados de massa específica e umidade ótima do solo, coletados in loco através de controle tecnológico com o emprego de fichas de controle por empresa especializada através do método do frasco de areia e do *Speedy*, conforme preconiza a DNER-ME 092/94 e a DNER-ME 052/94, respectivamente, em relação às variáveis: cota topográfica, números de dias de chuva antecedentes em até sete dias a data de compactação e volume pluviométrico destes dias. Os dados das variáveis de influência, número de dias com chuva antes da compactação e volume milimétrico acumulado de tais dias foram obtidas utilizando como referência as datas de compactação constantes em fichas de controle para consulta a base de dados de estação meteorológica do INMET através do endereço eletrônico da instituição. Enquanto que, os dados da variável cota topográfica foram coletadas utilizando como referência as coordenadas de localização contidos em fichas de controle e mapa setorizado do empreendimento para consulta a base de dados do site *Topographic*. Os dados coletados foram tratados através de análise estatística descritiva, onde foram obtidas: médias, modas, medianas, desvios padrão, coeficientes de variação e por conseguinte, foi verificada, através da correlação linear de Pearson, a correlação entre os pares: massa específica x cota, massa específica x chuva nos dias anteriores, umidade x cota e umidade x chuva nos dias anteriores. As evidências encontradas neste trabalho indicam que: a massa específica não apresenta correlação linear em relação a cota e a chuva nos dias anteriores a compactação, enquanto que, o par umidade x cota apresenta correlação linear positiva fraca e o par umidade x chuva nos dias anteriores apresenta correlação linear negativa fraca. Este estudo deve ser estendido para outros solos regionais de modo a validar as correlações obtidas e ampliar o seu campo de aplicação.

Palavras-chave: Subleito. Umidade ótima. Densidade. Chuva. Topografia.

ABSTRACT

Belém receives a high volume of rainfall annually, its climatic and topographic conditions cause circumstances that provide high rainfall. Given the striking climatic aspect of the capital of Pará, certain civil construction works have a specific weakness exposed annually during the rainy seasonal period, these are paving works. This work aims to evaluate the influence of rainfall frequency, rainfall volume and terrain topography on the density and optimal humidity of the hot machined asphalt concrete pavement subgrade in the Bougainville project, located on the banks of Av. Augusto Montenegro, metropolitan region of Belém. The methodology of this work consists of statistical analysis of specific mass and optimum soil moisture data, collected in situ through technological control using control sheets by a specialized company using the sand bottle method and the Speedy, as recommended by DNER-ME 092/94 and DNER-ME 052/94, respectively, in relation to the variables: topographic elevation, number of rainy days preceding the compaction date by up to seven days and rainfall volume on these days. The data on the influencing variables, number of days with rain before compaction and accumulated millimetric volume of such days were obtained using as a reference the compaction dates contained in control sheets for consultation of the INMET meteorological station database through the address institution's website. Meanwhile, data on the topographic elevation variable was collected using as a reference the location coordinates contained in control sheets and sectorized map of the project for consultation in the Topographic website database. The collected data were treated through descriptive statistical analysis, where: means, modes, medians, standard deviations, coefficients of variation were obtained and, consequently, the correlation between pairs was verified, through Pearson's linear correlation: specific mass x quota, specific mass x rain in previous days, humidity x quota and humidity x rain in previous days. The evidence found in this work indicates that: the specific mass does not present a linear correlation in relation to the level and the rain in the days prior to compaction, while the humidity x level pair presents a weak positive linear correlation and the humidity x rain pair in the previous days presents a weak negative linear correlation. This study should be extended to other regional soils in order to validate the correlations obtained and expand its field of application.

Keywords: Subgrade. Great humidity. Density. Rain. Topography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partículas componentes de um solo	17
Figura 2 - Conjunto de cilindro e soquete utilizados no ensaio original de Proctor...	18
Figura 3 - Conjunto de cilindro e soquete utilizados atualmente no Ensaio de Proctor	19
Figura 4 - Representação gráfica da curva de compactação de um solo.....	21
Figura 5 - Representação gráfica da curva de compactação do mesmo solo tendo energia de compactação variável.....	22
Figura 6 - Representação gráfica da curva de compactação de solos sob energia de compactação Proctor normal, considerando faixa granulométrica das argilas aos pedregulhos	23
Figura 7 - Curva de compactação segundo a teoria de Hogentogler	25
Figura 8 - Espessura média da película de água, segundo Hogentogler	26
Figura 9 - Camadas de um pavimento.	27
Figura 10 - Curva de compactação de um argissolo	34
Figura 11 - Resultado de ensaios de compactação de um argissolo	34
Figura 12 - Curva de compactação de um solo argiloso mediante energia de compactação Proctor Normal	35
Figura 13 - Umidade ótima, massa específica seca máxima e CBR de solo argiloso mediante energia de compactação Proctor Normal	35
Figura 14 - Curva de compactação de um latossolo de textura argilosa	36
Figura 15 - Curva de compactação de um latossolo de textura média	36
Figura 16 – Vista aérea da área de estudo	38
Figura 17 - Posicionamento do conjunto funil e frasco no método do frasco de areia	40
Figura 18 - Conjunto do aparelho “Speedy” para determinação de umidade	41
Figura 19 – Ficha de controle tecnológico	42
Figura 20 - Fluxograma de método de trabalho	43
Figura 21 - Representação gráfica da frequência de valores aferidos para a massa específica aparente do solo por classe	50
Figura 22 - Representação gráfica da frequência de valores aferidos para a massa específica aparente do solo.....	50
Figura 23 - Representação gráfica da frequência de valores aferidos para a massa específica aparente do solo.....	52

Figura 24 - Representação gráfica da frequência de valores aferidos para a massa específica aparente do solo.....	52
Figura 25 - Gráfico de dispersão com linha de tendência dos valores de massa específica aparente em função da cota do terreno	53
Figura 26 - Gráfico de dispersão com linha de tendência dos valores de massa específica aparente em função dos dias de chuva antes da compactação.....	54
Figura 27 - Gráfico de dispersão com linha de tendência dos valores de massa específica aparente em função do volume de chuva acumulada antes da compactação	54
Figura 28 - Gráfico de dispersão com linha de tendência dos valores de umidade ótima em função da cota do terreno	56
Figura 29 - Gráfico de dispersão com linha de tendência dos valores de umidade ótima em função dos dias de chuva antes da compactação	56
Figura 30 - Gráfico de dispersão com linha de tendência dos valores de umidade ótima em função do volume de chuva acumulada antes da compactação.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Base de dados geradas através de consulta a FC's, Topographic e INMET	47
Tabela 2 - Valores de medidas centrais e de dispersão aferidos para a massa específica aparente do solo.....	49
Tabela 3 - Valores de medidas centrais e de dispersão aferidos para a umidade do solo.....	51
Tabela 4 - Valores de correlação linear entre massa específica aparente e as variáveis	55
Tabela 5 - Valores de correlação linear entre massa específica aparente e as variáveis	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CaC₂ – Carbureto de cálcio

CAUQ – Concreto Asfáltico Usinado a Quente

CBR – California Bearing Ratio

cm – Centímetro

CP – Corpo de prova

CV – Coeficiente de variação

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

E – Energia

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

FC – Ficha de Controle

g – Grama

g/cm³ - Grama por centímetro cúbico

GC – Grau de Compacidade

h – Altura de queda do soquete

h – Teor de umidade

h_{ót} – Teor de umidade ótima

IDESP – Instituto de Desenvolvimento Econômico, Social e Ambiental do Pará

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

ISC – Índice de Suporte Califórnia

Kg – Quilograma

Km – Quilômetro

Km² – Quilômetro quadrado

m – Metro

mm – Milímetro

N – Número de golpes por camada

N – Número de elementos de uma série

n – Número de camadas

n – Número de elemento de uma série

NBR – Norma Técnica Brasileira

P – Massa do soquete

r – Coeficiente de correlação

S – Desvio padrão

SEGEP – Secretaria Municipal de Coordenação Geral do Planejamento e Gestão

V – Volume

x_i – Elemento de uma série de dados

y_i – Elemento de uma série de dados

μ - Massa específica

μ_s – Massa específica aparente seca

μ_{smáx} – Massa específica aparente seca máxima

Σ – Soma de todos os elementos

% – Percentual

$\bar{X}$ – Média aritmética

Δh – Desvio de umidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Considerações iniciais.....	13
1.2. Problema da pesquisa.....	14
1.3. Objetivos	15
1.3.1 Objetivo geral.....	15
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4. Justificativa.....	15
1.5. Metodologia.....	15
1.5.1. Organização metodológica do trabalho	16
 2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1. Compactação de solos.....	17
2.2. Execução de subleitos de pavimentos	26
2.2.1. Referências normativas.....	29
2.2.2. Etapas	30
2.2.3. Maquinário utilizado.....	31
2.2.4. Controle de execução.....	32
2.3. Estudos análogos.....	34
 3. MÉTODO.....	38
3.1. Caracterização da área de estudo	38
3.1.1. Empreendimento	38
3.1.2. Solo	39
3.1.3. Clima	39
3.2. Descrição dos procedimentos de controle tecnológico.....	40
3.3. Descrição do método de tratamento de dados.....	43
3.3.1. Parâmetros de tratamento estatístico.....	44

4. RESULTADOS.....	47
4.1. Resultados de massa específica aparente (μ)	49
4.2. Resultados de massa específica aparente (hót).....	51
4.3. Correlação de variáveis.....	53
 5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....	 59
5.1. Conclusões.....	59
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	60
 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 61

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A compactação de solos é uma técnica de suma importância para a execução de pavimentos, haja visto que, um solo em condições naturais usualmente não possui capacidade de suporte para receber as cargas de trabalho demandadas pelo trânsito de veículos e/ou máquinas e suas várias finalidades sem que haja comprometimento do desempenho e durabilidade da estrutura ao longo do tempo. Sua ausência pode levar a uma gama de custos, tanto tangíveis quanto intangíveis, como, recalque de solo, danos ao capeamento do pavimento, danos a infraestrutura urbana presente abaixo da estrutura do pavimento, inviabilização parcial ou total de tráfego em vias que necessitem reparos, demandando até mesmo mobilização dos órgãos reguladores de trânsito, busca de rotas alternativas, entre outros.

Trata-se de uma operação simples e de grande importância pelos seus consideráveis efeitos sobre a estabilização de maciços terrosos, relacionando-se, intimamente, com os problemas de pavimentação e barragens de terra. (CAPUTO, 1988)

Tratando-se de um processo técnico, o mesmo necessita de parâmetros mensuráveis que possam validar os resultados obtidos durante ou após a aplicação dos métodos de compactação. Com base nisso, conforme orienta o DNIT, são avaliados usualmente o Grau de Compactação (GC) e o desvio de umidade (Δh) a fim de que se obtenha um alto grau de durabilidade da obra. A avaliação do grau de compactação e do desvio de umidade, quando aplicada, visa avaliar se, ao aplicar-se o método, o solo trabalhado alcançou o máximo grau de densidade possível em campo quando comparado às amostras ensaiadas em laboratório sob maiores condições de controle de fatores influentes ao aumento de resistência do solo: energia de compactação e umidade.

Dado o peso da influência do teor de água na resistência de maciços terrosos, obras de pavimentação são especialmente frágeis no que tange a períodos chuvosos, uma vez que, é altamente contraindicado que se execute tais obras em referidos períodos, conforme preconiza a DNIT 137/2010-ES, pois, especialmente durante a execução das estruturas de base do pavimento busca-se controle do índice de umidade do solo para que se obtenham resultados otimizados de compactação, além do fato de que, a saturação do solo inviabiliza a operação de máquinas pesadas sobre a superfície a ser trabalhada, enquanto saturada, podendo ocasionar perdas e retrabalho caso haja tráfego sobre a área momentaneamente fragilizada.

Concernente ao aspecto climático da área abordada neste trabalho, temos o clima de Belém, que segundo a EMBRAPA (2018), é uma região caracterizada pela alta umidade, elevada temperatura e pelo relevante volume de chuvas ocorrentes, via

de regra por convecção devido a sua temperatura média e configuração geográfica que comporta corpos d'água em larga escala.

A região de Belém está localizada às margens da Baía do Guajará, na confluência com o Rio Guamá à aproximadamente 120 km do Oceano Atlântico, apresentando uma área de 719 km², com altitude média de 12m. Sua principal característica fisiográfica, além da baixa altitude, é de apresentar grande quantidade de pequenos corpos de água, conhecidos regionalmente como furos e igarapés, os quais associados à baixa latitude, condicionam à região, um ambiente climático quente e úmido. (BASTOS, 2002; PACHECO, 2002; NECHET, 2002; ABREU SÁ, 2002)

Em suma, a região de Belém, devido à sua característica climática, anualmente apresenta período que proporciona cenário consideravelmente desfavorável à execução de obras de pavimentação, uma vez que, o consistente volume de chuvas em certos períodos do ano torna oneroso o controle de umidade do solo. Aliado a este fator, existe a questão topográfica, pois, áreas que possuem cotas topográficas baixas tendem a sofrer com o acúmulo de água e a possuir lençóis freáticos menos profundos, de tal forma que, torna-se interessante investigar através de estatística descritiva, ferramenta amplamente utilizada, a influência de tais variáveis sobre a densidade e a umidade do solo.

O uso de dados estatísticos remonta aos censos realizados na antiga Babilônia, Egito e, mais tarde, no Império Romano, quando os dados coletados eram sobre assuntos relacionados ao Estado, tais como nascimentos e óbitos. Na verdade, a palavra *estatística* é derivada da palavra latina *status*, que significa “estado”. A prática moderna da estatística envolve mais que contar nascimentos e óbitos. Estatística é a ciência que trata da coleta, organização, análise e interpretação dos dados para a tomada de decisões. (LARSON, 2015; FARBER, 2015)

1.2. Problema de Pesquisa

Devido a condição climática da região de Belém, foi realizada investigação descritiva buscando avaliar, através de relação de variáveis, o grau de influência da chuva na região e da topografia do terreno no desempenho de subleitos a fim de avaliar possíveis medidas de mitigação ou prevenção de efeitos que venham a comprometer a resistência de maciços terrosos, caso ocorram.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Efetuar avaliação no que tange a influência do greide do terreno e das chuvas nos parâmetros de compactação do subleito, massa específica e umidade através de estatística descritiva.

1.3.2. Objetivos Específicos

Apresentar dados gerados através de controle tecnológico para fins de análise estatística dos parâmetros de massa específica obtidos in situ.

Apresentar dados gerados através de controle tecnológico para fins de análise estatística dos parâmetros de umidade obtidos in situ.

Analisar correlação entre dados de massa específica aparente, umidade, cotas de elevação, frequência e volume pluviométrico.

1.4. Justificativa

Devido ao elevado índice de chuvas e baixo nível topográfico da região sob análise, a ausência de estudo sobre a influência do fator climático e greide do terreno na execução de pavimentos ocasiona carência de trabalhos acadêmicos dessa área na região Norte do Brasil, tal ferramenta de auxílio à tomada de decisão em obras semelhantes sobre o momento adequado e/ou cuidados extras a serem tomados para a compactação de subleitos, poderá incorrer a redução de custos de obras de pavimentação, tanto em fase execução quanto na manutenção destas.

1.5. Metodologia

Coletar de dados, organizar em planilha, tratar estatisticamente os dados de controle de compactação gerados in situ e verificar dos resultados em função de embasamento teórico levantado através de consulta a fontes secundárias para fins de análise quantitativa.

1.5.1. Organização Metodológica do Trabalho

O trabalho está estruturado em capítulos alinhados aos seus objetivos, por isso cada capítulo apresenta uma forma particular de método de pesquisa. A organização do trabalho e os métodos utilizados em cada capítulo são dados da seguinte maneira:

- Introdução: apresentar e contextualizar o trabalho; definir o problema e a questão de pesquisa; apresentar o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho; justificar a importância e relevância do estudo; e apresentar os métodos de pesquisa utilizados.
- Revisão bibliográfica: apresentar o embasamento técnico e teórico adotado para critérios de execução, apresentar as referências bibliográficas, documentos técnicos, normas vigentes, citar de documentos pertinentes para avaliar e validar os resultados encontrados;
- Método: caracterizar da área de estudo em aspectos físicos e climáticos. Descrever os procedimentos de coleta de dados, métodos de controle, coleta e tratamento de dados, equipamentos empregados, apresentação de formulários de controle, análise estatística de dados.
- Apresentação e discussão dos resultados: apresentar detalhadamente os indicadores obtidos através de planilha de base de dados e analisar a correlação linear entre as variáveis tratadas pautadas neste trabalho.
- Conclusão: realizar as ponderações finais acerca dos resultados obtidos em função dos dados analisados e do referencial teórico e por conseguinte, fazer sugestões para trabalhos futuros e propor soluções práticas para o problema encontrado.

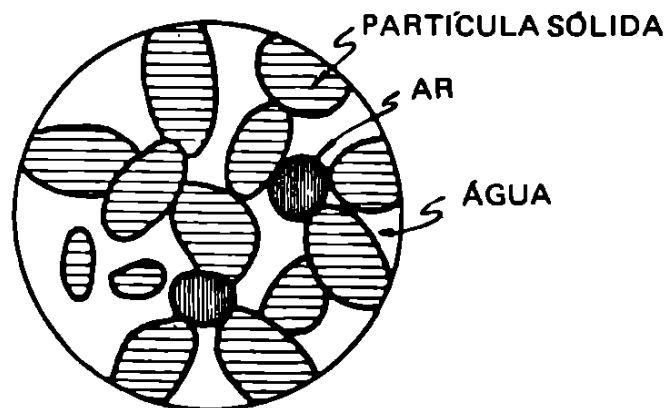
2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentadas as referências teóricas acerca de três eixos: Compactação de solos, execução de subleitos de pavimentos e estudos análogos de solos de subleito.

2.1. Compactação de Solos

O solo é um material constituído por um conjunto de partículas sólidas, deixando entre si vazios que poderão estar parcial ou totalmente preenchidos pela água. É, pois, no caso mais geral, um sistema disperso formado por três fases: sólida, líquida e gasosa. (CAPUTO, 1988), Figura1.

Figura 1 - Partículas componentes de um solo.



Fonte: Caputo, 1988.

A compactação é um dos processos que visa melhorar as propriedades do solo (e de outros materiais, como misturas betuminosas) garantindo certa homogeneidade, procedendo-se a eliminação do ar. Esta operação resulta no aumento da massa específica aparente pela aplicação de pressão, impacto ou vibração, o que faz com que as partículas constitutivas do material entrem em contato mais íntimo, pela expulsão de ar. A compactação dos solos, em geral, promove um aumento na resistência ao cisalhamento e na capacidade de carga e uma redução da compressibilidade e da permeabilidade, gerando um maior módulo de elasticidade ou deformação, o que se traduz, genericamente, pelo termo estabilidade. (LELIS, 2004)

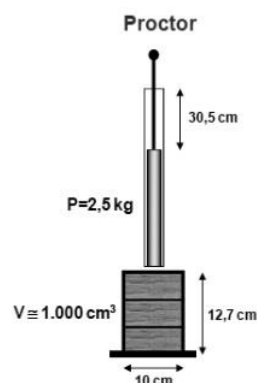
A compactação de um solo é sua densificação por meio de equipamento mecânico, geralmente um rolo compactador, embora, em alguns casos, como em pequenas valetas, até soquetes manuais possam ser empregados. (PINTO, 2006)

A compactação, segundo Caputo (1988), é o processo mecânico ou manual que visa reduzir o índice de vazios do solo e, assim, aumentar sua resistência, tornando-o mais estável. Trata-se de uma operação simples e de grande importância pelos seus consideráveis efeitos sobre a estabilização de maciços terrosos, relacionando-se, intimamente, com os problemas de pavimentação e barragens de terra.

A compactação pode ser entendida como um processo em que se visa melhorar as propriedades de um dado material, através da compressão do mesmo por meio de uma determinada energia mecânica. Dentre os principais benefícios, em termos de propriedades geotécnicas, adquiridos através do processo de compactação, podem ser citados o aumento da densidade, da resistência ao cisalhamento e da capacidade de suporte, retratada através do CBR. A compactação também reduz o índice de vazios, a permeabilidade, a contração e a compressibilidade (SOUZA JUNIOR, 2007).

O engenheiro norte-americano Ralph R. Proctor é tido como o predecessor da técnica de compactação, em meados de 1933 ele publicou observações feitas acerca da compactação de aterros. Em seus trabalhos demonstrou que a massa específica resultante de um solo ocorre em função da energia de compactação e da umidade, estabelecendo uma relação entre estes dois fatores, quando o maciço terroso for sujeito a um certo número de passadas de um determinado equipamento em campo ou determinado número de golpes sobre amostra contida em molde, conforme visto na Figura 2.

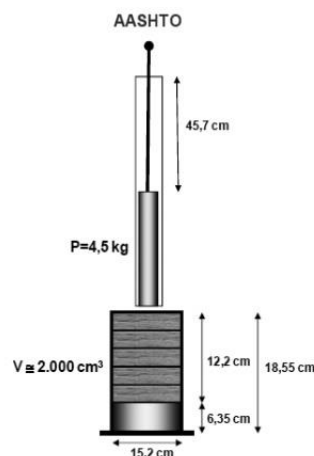
Figura 2 - Conjunto de cilindro e soquete utilizados no ensaio original de Proctor.



Fonte: <https://www.suportesolos.com.br/>

O método desenvolvido por Proctor, internacionalmente utilizado, no Brasil foi normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas através da ABNT NBR 7182/86 e pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, até então Departamento Nacional de Estradas de Rodagem através da DNER-ME 162/94. Atualmente, a norma de referência internacional do ensaio é a AASHTO T 180 (*The American Association of State Highway and Transportation Officials* - Associação Norte-Americana de especialistas rodoviários e de transporte.) e a norma brasileira vigente para o ensaio é a DNIT 164/2013-ME, que consiste em moldar corpos de prova com diferentes teores de umidade a uma determinada energia de compactação em molde cilíndrico com auxílio de soquete, conforme visto na Figura 3.

Figura 3 - Conjunto de cilindro e soquete utilizados atualmente no Ensaio de Proctor



Fonte: <https://www.suportesolos.com.br>

No que concerne a energia de compactação deste método, esta ocorre em função da massa do soquete, altura de queda e número de golpes aplicados por camada de amostra. Atualmente a normativa aborda três níveis, em ordem crescente de energia temos: Proctor Normal, Intermediário e Modificado. Estes níveis de energia se alteram em função do número de golpes aplicados por camada com o soquete à amostra ensaiada, sendo 12 no Proctor Normal, 26 no Proctor Intermediário e 55 no Proctor Modificado. Além destas, existem dois níveis intermediários alternativos de energia de compactação que são: Proctor Internormal (18 golpes) e Proctor Intermodificado (40 golpes). A energia de compactação deste ensaio é calculada através da Fórmula 1.

$$E = \frac{PhNn}{V} \quad (1)$$

onde:

E = energia específica de compactação, por unidade de volume;

P = peso do soquete;

h = altura de queda do soquete;

N = número de golpes por camada;

n = número de camadas;

V = volume do solo compactado.

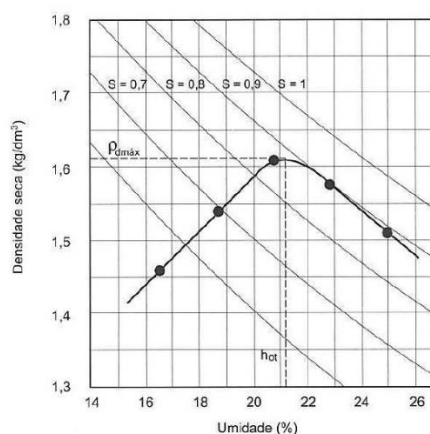
A energia normal foi escolhida para, de certa forma, aproximar a compactação de laboratório à de campo, compatível, portanto, com os equipamentos usados normalmente nos serviços de terraplanagem. No entanto, durante a Segunda Grande Guerra (1939-1945), com o advento de bombardeiros pesados, as pistas de aeroportos necessitaram de aterros com uma capacidade de suporte maior, o que se conseguiu empregando-se equipamentos de compactação mais pesados. Isto levou à introdução, em laboratório, da energia modificada. Finalmente, tem-se o ensaio na energia intermediária, de emprego comum em pavimentação, que, como o próprio nome diz, impõe no solo uma energia que está entre a normal e a modificada. (LELIS, 2004)

Graficamente, a relação entre a massa específica aparente seca (μ) e o teor de umidade (h) pode ser descrita através de uma curva de formato similar a uma parábola. A curva tem seu ponto máximo definido pelo par de valores massa específica aparente seca máxima ($\mu_{sm\acute{a}x}$) e umidade ótima ($h_{ót}$), segundo a terminologia empregada pela ABNT (1986). Comumente, o trecho ascendente da curva de compactação é conhecido como ramo seco e o descendente como ramo úmido.

Para o traçado da curva é conveniente a determinação de uns cinco pontos, procurando-se fazer com que dois deles se encontrem na zona seca (ramo esquerdo da curva), um próximo à umidade ótima e os outros dois na zona úmida (ramo direito da curva). (CAPUTO, 1988)

No que tange aos ramos da curva de compactação, o ponto de convergência do trecho ascendente e do trecho descendente, densidade máxima do solo, ramo seco e ramo úmido respectivamente, representa também o grau máximo de interação entre as partículas sólidas do solo no que cerne a resistência, haja visto que, ao ponto que ocorre o afastamento da convergência em direção ao ramo seco, do vértice da curva para a esquerda, ocorre incremento das forças de atrito entre os grãos, dificultando um rearranjo adequado das partículas que proporcione ganho de desempenho, enquanto que, ao passo que ocorre afastamento do ponto de convergência no sentido do ramo úmido, do vértice para a direita, ocorre a saturação do solo e as lacunas entre as partículas sólidas são ocupadas por água, aumentando consideravelmente o espaço entre partículas e reduzindo a interação entre estas, Figura 4.

Figura 4 - Representação gráfica da curva de compactação de um solo.



Fonte: Pinto, 2006

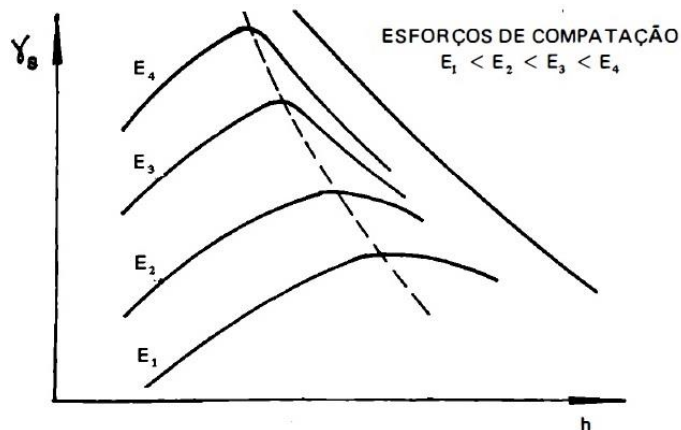
Conforme pode ser observado no gráfico padrão da curva de compactação, a saturação de um maciço terroso ocasiona redução da capacidade de suporte do solo, tornando-se desta forma, prejudicial para o corpo estradal, pois, a partir do ponto que se adentra no ramo úmido, esta leva a um enclausuramento dos vazios contidos no solo e a partir daí a energia de compactação terá sua efetividade comprometida no que tange a expulsão do ar, ocasionando relativa instabilidade à estrutura do solo.

Quando o solo se encontra com umidade abaixo da ótima, a aplicação de maior energia de compactação provoca um aumento de densidade seca, mas, quando a umidade é maior que a ótima, maior esforço de compactação pouco ou nada provoca de aumento da densidade, pois não consegue expelir o ar dos vazios. Isso ocorre

também no campo. A insistência da passagem de equipamento compactador quando o solo se encontra muito úmido faz com que ocorra o fenômeno que os engenheiros chamam de *borrachudo*: o solo se comprime na passagem do equipamento para, logo a seguir, se dilatar, como se fosse uma borracha. O que se comprime são as bolhas de ar ocluso. (PINTO, 2006).

Entretanto, quando tal solo é compactado segundo um mesmo procedimento, mas, com emprego de diferentes níveis de energia de compactação, verifica-se que, na medida em que a energia de compactação aumenta, a umidade ótima diminui e a massa específica seca máxima sofre incremento, conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Representação gráfica da curva de compactação do mesmo solo tendo energia de compactação variável.

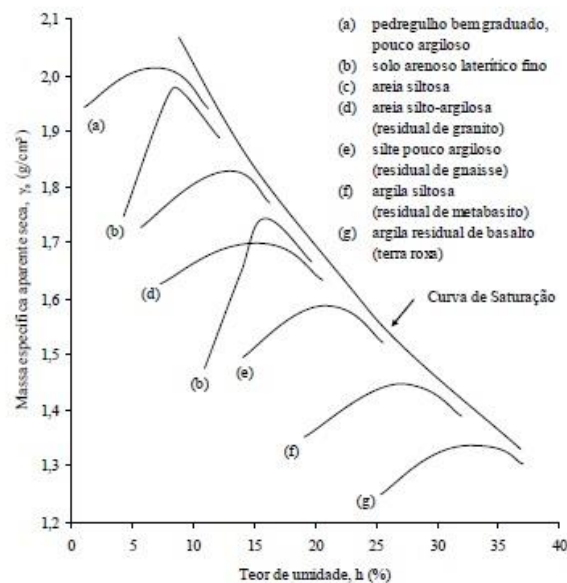


Fonte: Caputo, 1988.

Todavia, é importante ressaltar que, economicamente falando, o que se busca ao aplicar a técnica de compactação com eficiência é justamente trabalhar a umidade do solo a fim de reduzir a energia a ser aplicada, visando a redução horas trabalhadas do maquinário a ser empregado para aplicação desta energia e consequente redução de custos.

Por outro lado, a influência do tipo de solo na curva de compactação encontra-se ilustrada na Figura 6. Considerando-se uma mesma energia de compactação, observa-se que, em geral, os solos argilosos apresentam umidades ótimas mais elevadas e massas específicas aparentes secas máximas menores do que os solos siltosos e arenosos. (CRISPIM, 2007)

Figura 6 - Representação gráfica da curva de compactação de solos sob energia de compactação Proctor normal, considerando faixa granulométrica das argilas aos pedregulhos.



Fonte: Pinto, 2000.

Sendo assim, observa-se que a compactação de solos em campo, em resumo, trabalha basicamente com dois fatores: energia de compactação e teor de umidade (h), visando aumento da massa específica aparente seca (μ_s), utilizando-se das propriedades físicas do solo e da água para promover a redução do índice de vazios e obter o resultado final aplicável à obra de construção civil que seguirá. É válido ressaltar que à medida que se diminui a granulometria de um solo aumenta-se a umidade ótima, uma vez que ocorre aumento da área específica de superfície.

Sob esse prisma, pode-se dizer que cabe ao engenheiro projetista de uma obra de terra especificar qual é a redução necessária do índice de vazios para um determinado fim de engenharia e definir a melhor maneira de obtê-la no campo, após a obtenção dos parâmetros de projeto, em geral, via ensaios de compactação realizados em laboratório. Essa decisão envolve a escolha do equipamento de compactação, assim como a definição do processo construtivo e das etapas do controle de compactação no campo. (CRISPIM, 2007)

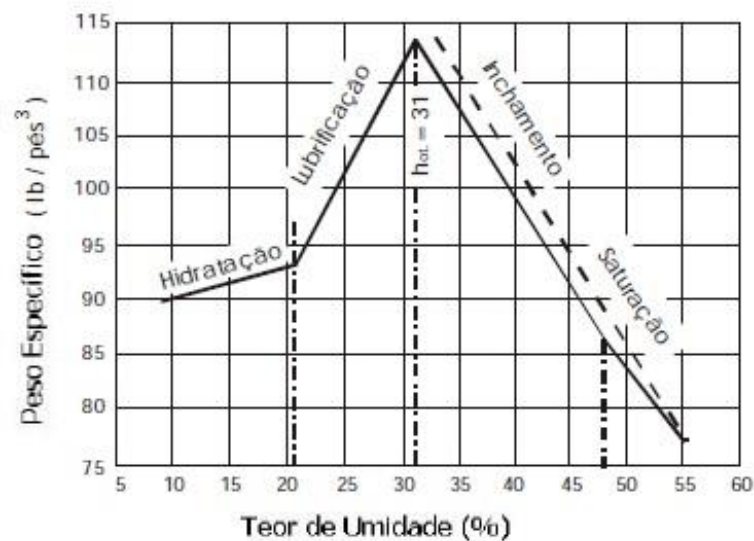
Quanto ao solo, ocorre que as partículas granulares deste apresentam um determinado nível de atrito entre si, fator que dificulta a acomodação natural dos grãos de modo que acabem ocorrendo vazios dentro do solo, entretanto quando este é

solicitado, dependendo da energia empregada, o solo tende a ter sua estrutura modificada, uma vez que, ocorre a reorganização dos grãos podendo levar a um recalque deste solo. Em relação a água, faz-se uso de duas propriedades físicas que são de suma importância para que a compactação de solos seja eficiente e são elas a viscosidade e a incompressibilidade, quanto ao primeiro fator, a interação da água com as partículas sólidas do solo favorece a acomodação dos grãos, uma vez que, a viscosidade da água favorecerá a reorganização dos grãos graças a redução de atrito entre estes, que ela proporcionará. O fato de a água ter sua resistência ao cisalhamento nula é imprescindível para que haja o incremento de interação entre as partículas sólidas do solo promovendo a otimização da resistência mecânica. O segundo fator é importante devido ao interesse que há na permanência da água no solo, uma vez que, deseja-se reduzir o índice de vazios do solo valendo-se da energia de compactação, expulsão do ar contido neste e aumento da interação dos grãos devido a acomodação otimizada pela viscosidade da água, em síntese, devido a incompressibilidade a água permanecerá e o ar tenderá a ser expulso do solo uma vez que, a este seja aplicada determinada energia de compactação. A manutenção da umidade adequada do solo trabalhado tem grande relevância econômica, uma vez que, alcançada a umidade ótima, esta acarretará em uma redução da energia de compactação necessária para que se alcance a resistência desejada, ou seja, reduzirá a quantidade de horas trabalhadas das máquinas que fornecem esta energia e por conseguinte reduzirá os custos de serviço.

Além de Proctor, houveram pesquisadores com outras teorias que ocorrem em função: da capilaridade, lubrificação, viscosidade da água, interação físico-química e tensões efetivas, a fim de justificar o comportamento da curva de compactação. Entre estes, é válido mencionar HOGENTOGLER (1937) e sua teoria relativamente simples, porém, de grande valia para análise dos efeitos da adição de água a maciços terrosos.

Hogentogler trouxe-nos uma teoria baseada na viscosidade da água e apresenta uma curva de compactação que passa por quatro estágios de umidade: hidratação, lubrificação, inchamento e saturação do solo, Figura 7.

Figura 7 – Curva de compactação segundo a teoria de Hogentogler.



Fonte: Adaptado de Hogentogler (1937)

Na fase inicial da curva, a de hidratação, o aumento de umidade gera um acréscimo a espessura das camadas de água adsorvida nos grãos do solo, formando uma película que reveste os mesmos, reduzindo a viscosidade da água. Essa redução atenua o atrito entre os grãos e favorece o aumento da massa específica do solo. Este fenômeno é chamado por Hogentogler de *Effect of Film Thickness* (efeito da espessura do filme).

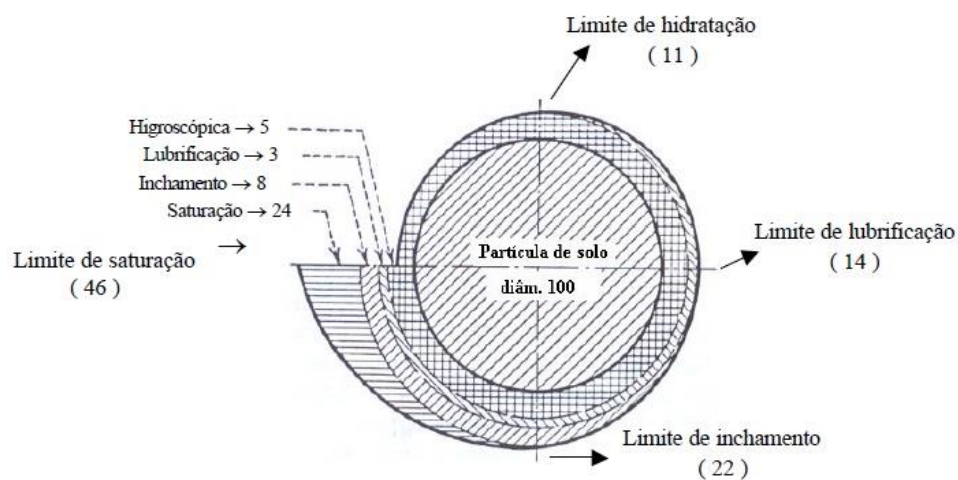
A partir de um certo grau de umidade, a adição de água ocasiona lubrificação das partículas, não havendo mais influência sobre a viscosidade da água. Essa é a fase de lubrificação, cujo efeito é magnificado quando o solo é compactado no teor de umidade ótima.

Havendo acréscimo além da umidade ótima, a água atuará no deslocamento das partículas do solo, desencadeando o fenômeno chamado por Hogentogler de inchamento, nesta fase é possível verificar uma redução significativa da densidade do maciço terroso.

Por fim, ocorre a etapa de saturação, nesta fase ocorre o completo preenchimento dos vazios do solo por água.

Hogentogler evidenciou a importância da película de água que se forma em volta dos grãos do solo, na compactação, à medida que o teor de umidade aumenta. A espessura de película, cuja unidade é medida em polegadas, divididas por um milhão, que representa a umidade higroscópica de uma partícula de areia tem valor por volta de 5 e os limites de lubrificação, inchamento e saturação estão em torno de 14, 22 e 46 polegadas (por milhão), respectivamente. As espessuras média da película de umidade para uma partícula de solo podem ser vistas na Figura 8.

Figura 8 – Espessura média da película de água, segundo Hogentogler.



Fonte: Adaptado de Hogentogler (1937)

2.2. Execução de Subleitos de Pavimentos

As estruturas de pavimentos são sistemas de camadas assentes sobre uma fundação chamada subleito. O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento. A engenharia rodoviária subdivide as estruturas de pavimentos segundo a rigidez do conjunto: em um extremo, tem-se as estruturas rígidas e, no outro, as flexíveis. (BERNUCCI et al, 2008)

Via de regra os pavimentos asfálticos tem como característica uma maior nobreza de materiais à medida que se avança as camadas superiores de tal forma que uma camada superior terá características físicas mais elevadas que a imediatamente inferior a ela no que tange a resistência em geral.

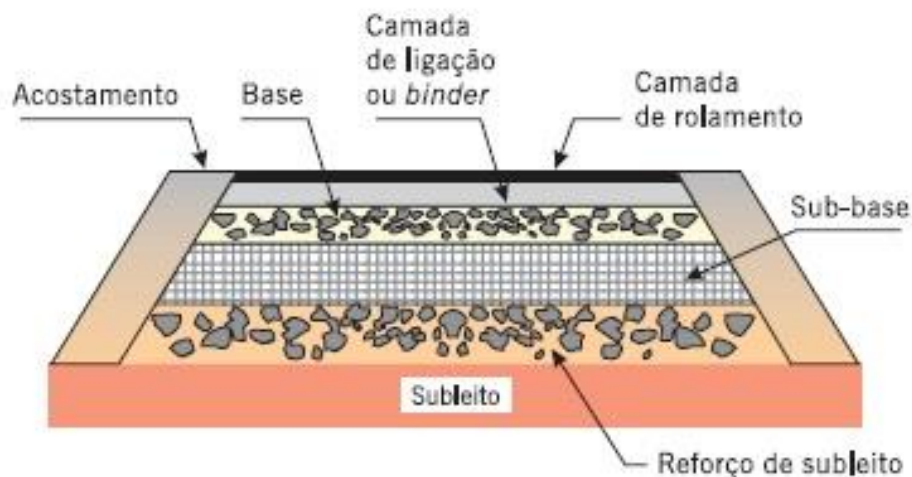
Na execução de uma rodovia, deve-se considerar o fato de o pavimento ser uma estrutura estratificada, onde cada camada apresenta características próprias. Estas camadas estão sujeitas a cargas provenientes do tráfego de veículos, esforços estes distribuídos horizontal e verticalmente (tensões cisalhantes e normais) até

atingirem o subleito. O terreno de fundação do pavimento rodoviário (subleito) recebe uma parcela dessas tensões, devendo apresentar características portantes, compatíveis com essas solicitações. Com isso, ao dimensionar-se um pavimento é necessário conhecer o comportamento do subleito, especialmente em relação a deformabilidade e resistência do solo. (SANTOS, 2016)

Pavimento de uma rodovia é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito – a infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito. (DNIT, 2006)

Conforme mencionado e ilustrado na Figura 9, o subleito é a camada inferior de suporte da estrutura do pavimento. Tais camadas são dimensionadas de acordo com as demandas de projeto e características dos insumos disponíveis.

Figura 9 - Camadas de um pavimento.



Fonte: Bernucci et al, 2008.

Segundo o DNIT (2006):

- a) Pavimento: é a estrutura construída após a terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente em seu conjunto a: resistir a distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos do tráfego; melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e conforto; resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento.

- b) Subleito – é o terreno de fundação do pavimento;
- c) Leito – é a superfície obtida pela terraplanagem ou obra-de-arte e conformada ao seu greide e perfis transversais;
- d) Greide do leito – é o perfil longitudinal do leito;
- e) Regularização – é a camada posta sobre o leito, destinada a conformá-lo transversal e longitudinalmente de acordo com as especificações; a regularização não constitui, propriamente uma camada do pavimento, sendo, a rigor, uma operação que pode ser reduzida em corte do leito implantado ou em sobreposição a este, de camada com espessura variável;
- f) Reforço do subleito – é uma camada de espessura constante, posta por circunstâncias técnico-econômicas, com características geotécnicas inferiores ao material usado na camada que lhe for superior, porém, melhores que o material do subleito;
- g) Sub-base – é a camada complementar à base, quando por circunstâncias técnico-econômicas não for aconselhável construir a base diretamente sobre a regularização;
- h) Base – é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se constrói o revestimento;
- i) Revestimento – é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a melhorá-la, quanto à comodidade e segurança e a resistir ao desgaste.

A regularização de subleitos, é a operação destinada a conformar o leito estradal, transversal e longitudinalmente, obedecendo às larguras e cotas constantes das notas de serviço de regularização de terraplenagem do projeto, compreendendo cortes ou aterros até 20 cm de espessura. (DNIT, 2010)

O subleito assim como todas as outras camadas do pavimento possuem grande relevância no processo de pavimentação, sobretudo devido ao seu posicionamento, pois trata-se da camada assente presente no nível mais inferior da estrutura, repousando sobre esta as demais camadas. Tratando-se do modal rodoviário o modelo de transporte mais difundido no Brasil, os órgãos competentes buscaram prefixar procedimentos que vão da execução ao controle de qualidade final dos pavimentos. No que tange a execução de subleitos de pavimentos, o órgão máximo

responsável é o DNIT (antigo DNAER), sendo este responsável pela manutenção, ampliação, construção, fiscalização e elaboração de estudos e documentos técnicos visando a resolução de problemas de infraestrutura de transportes terrestres e aquaviários e é integrante do Sistema Federal de Viação.

A regularização de subleitos é regida pela norma DNIT 137/2010-ES que preconiza quanto ao uso de materiais, sejam eles oriundos do próprio subleito ou importados, equipamentos, execução, condicionantes ambientais, inspeções e critérios de medição.

2.2.1. Referências Normativas

Devido a sua relevância dentro da estrutura de pavimentos, conforme mencionado anteriormente, a regularização de subleitos possui norma regulamentadora dedicada. Esta norma tem por objetivo estabelecer a sistemática a ser empregada na execução da regularização do subleito de rodovias a pavimentar, com a terraplanagem já concluída. (DNIT, 2010).

Esta tem como referência normativa as normas abaixo:

- DNER-ME 036/94: Solo - Determinação da massa específica aparente, In Situ, com emprego do balão de borracha;
- DNIT 172/2016-ME: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas (em substituição a DNER-ME 049/94);
- DNER-ME 052/94: Solos e agregados miúdos – Determinação da umidade com emprego do “Speedy”;
- DNER-ME 080/94: Solos – Análise granulométrica por peneiramento;
- DNER-ME 082/94: Solos – Determinação do limite de plasticidade;
- DNER-ME 088/94: Solos – Determinação da umidade pelo método expedito do álcool;

- DNER-ME 092/94: Solo – Determinação da massa específica aparente, In Situ, com emprego do frasco de areia;
- DNER-ME 122/94: Solos – Determinação do limite de liquidez – Método de referência e método expedito;
- DNIT 164/2013-ME: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas (em substituição a DNER-ME 129/94);
- DNER-PRO 277/97: Metodologia para controle estatístico de obras e serviços;
- DNIT 001/2009-PRO: Elaboração e apresentação de normas do DNIT;
- DNIT 011/2004-PRO: Gestão da qualidade em obras rodoviárias;
- DNIT 070/2006 – PRO: Condicionantes ambientais das áreas de uso das obras;
- DNIT 105/2009-ES: Terraplanagem - Caminhos de serviço;
- DNIT 106/2009-ES: Terraplenagem – Cortes;
- DNIT 107/2009-ES: Terraplenagem – Empréstimos;
- DNIT 108/2009-ES: Terraplenagem – Aterros.

2.2.2. Etapas

Determinada em projeto a resistência que a camada assente deve apresentar para suportar as cargas solicitantes, a execução de subleito tem então seu início dentro do laboratório, pois, com base no estudo de utilização do pavimento final e cargas demandadas por este, são ensaiadas amostras do solo para verificação de atendimento, dos então estabelecidos, parâmetros de resistência que o mesmo deve apresentar para avaliação do grau de compactação e desvio de umidade.

Em laboratório serão constatados os parâmetros do solo ensaiado, tais como: massa específica seca máxima e umidade ótima através do Ensaio de Proctor, índice de expansão e ISC (Índice de Suporte Califórnia) através do Ensaio de Determinação do índice de Suporte Califórnia. Partindo do princípio de que as características do solo ensaiado atenderão as solicitações de projeto, procede-se a etapa de campo.

A regularização de subleito se inicia pela extração de material de origem orgânica do leito da via a ser trabalhada, pois, a ocorrência de material orgânico dentro da camada assente poderá incorrer em vazios uma vez que o material se decomponha dentro desta.

No caso de aproveitamento do subleito de estradas já implantadas, cascalhadas, o solo na profundidade de 0,20m abaixo do greide preparado para receber o pavimento deve ser escarificado, umedecido e compactado conforme energia indicada. No caso de ocorrência de solos com ISC inferior a 2%, deve-se efetuar substituição destes solos na espessura a ser definida de acordo com os critérios adotados nos estudos geotécnicos. Para subleito com solos de expansão superior a 2%, deve ser determinada, experimentalmente, a sobrecarga necessária para o solo apresentar expansão menor que 2%. O peso próprio do pavimento projetado deve transmitir para o subleito pressão igual ou maior do que a determinada pelo ensaio. Caso o peso próprio da estrutura não seja suficiente para proporcionar pressão maior ou igual à determinada no ensaio de sobrecarga, deve-se efetuar a substituição de solos em espessura definida nos estudos geotécnicos realizados. (ROSSI, 2017)

Com a execução de cortes, aterros e adição de material para atingimento do greide de projeto realizada, não superior a uma camada de 20cm de altura, efetua-se a escarificação a uma profundidade de 20cm com o auxílio de trator com grade aradora, e caminhão tanque com espargidor caso necessário, seguido de secagem ou umidificação. Com o solo em estado de umidade desejável é dado início a compactação com rolo pé de carneiro efetuando o número de passadas definidas em projeto a fim de fornecer energia necessária para atingimento da resistência desejável para por fim, dar vez ao rolo compactador liso que efetuará um determinado número de passadas para atingir o acabamento desejado da camada.

2.2.3. Maquinário Utilizado

A compactação em si trata-se de um processo relativamente simples, porém, que demanda equipamentos pesados, tais como:

- Motoniveladora com escarificador;
- Caminhão tanque distribuidor de água;
- Trator de pneu;
- Arados de disco;
- Rolo compactador tipo pé-de-carneiro;
- Rolo compactador tipo liso-vibratório;
- Rolo compactador pneumático;
- Pulvimisturador.

2.2.4. Controle de Execução

Um condicionante primordial para execução da regularização de subleitos e particularmente um dos objetos de análise deste estudo, segundo o DNIT, é a não operacionalização em dias de chuva, tal qual, é de responsabilidade do executor precaver-se quanto a proteção e preservação dos serviços e materiais contra a ação destrutiva das chuvas, do tráfego e de qualquer outro agente danoso ao corpo estradal em construção.

O controle de execução de subleito ocorre baseado em coletas de amostras, ensaios e determinações fundamentados em um plano de amostragem a fim de validar os resultados obtidos em campo em relação aos dados do solo obtidos em ensaio dentro do laboratório. Através deste controle são formatados planos de ação para atingimento de desempenho otimizado do maciço terroso.

Antes que se dê início à compactação é demandado que imediatamente antes desta ocorra o ensaio de umidade higroscópica do material *in situ*, para cada trecho de 100m de via a ser compactada, tal verificação deve ocorrer conforme preconiza o DNER-ME 052/94 ou o DNER 088/94, método do *Speedy* e método expedito do álcool, respectivamente. A tolerância quanto a umidade registrada deve ser de $\pm 2\%$ em relação à umidade ótima.

Após a etapa de compactação é procedida a coleta de amostra para determinação da massa específica aparente seca *in situ* cuja verificação deverá ocorrer conforme preconiza o DNER-ME 036/94 ou o DNER-ME 092/94, método do balão de borracha e método do frasco de areia, respectivamente. Para pistas com extensão limitada, com volumes de, no máximo, 1.250m³ de material, devem ser realizadas, pelo menos cinco determinações para o cálculo de grau de compactação (GC).

De posse dos dados de massa específica aparente seca máxima, obtida em laboratório, e massa específica aparente seca *in situ*, obtida na pista, é realizado o cálculo do grau de compactação do trecho de via. O grau de compactação obtido a partir desta relação não deve ser inferior a 100%, tomando a massa específica aparente seca máxima obtida em laboratório como referencial.

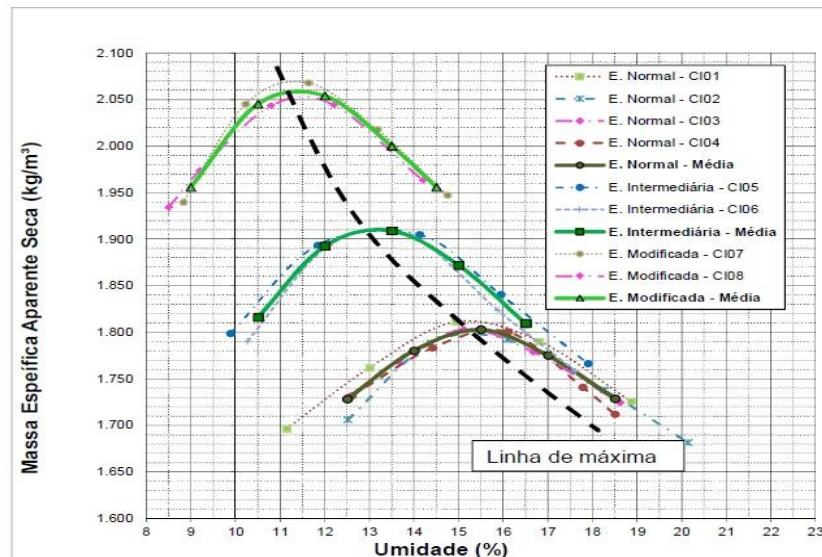
2.3. Estudos Análogos

Segundo Balbo (2007), os esforços impostos sobre a superfície do subleito serão aliviados em sua profundidade (normalmente se dispersam no primeiro metro). Deve-se, portanto, ter maior preocupação com seus estratos superiores, onde os esforços solicitantes atuam com maior magnitude. O subleito será constituído de material natural consolidado e compactado, por exemplo, nos cortes do corpo estradal, ou por um material transportado, no caso dos aterros. Eventualmente, será também aterro sobre corte de características medíocres para subleito.

Os estudos de Zago (2016) sobre análise de solos de subleito constataram que as curvas de compactação de argissolos ensaiados apresentaram comportamento esperado da relação de aumento de energia de compactação e decréscimo da umidade ótima. Suas análises também demonstraram que o solo possui sensibilidade à presença de água no que tange ao ISC, uma vez que os resultados dos corpos de prova submetidos a imersão por 96h em água foram inferiores aos CP's não imersos. Evidenciou-se a influência do índice de finos na umidade ótima, uma vez que, amostras com maior presença de finos denotam maior superfície específica e apresentaram maiores valores para a umidade ótima. As densidades verificadas

apresentaram médias que variaram de 1.798 kg/m³ para energia normal de compactação a 2.052 kg/m³ para energia modificada, Figuras 10 e 11.

Figura 10 – Curva de compactação de um argissolo.



Fonte: Zago, 2016

Figura 11 – Resultado de ensaios de compactação de um argissolo.

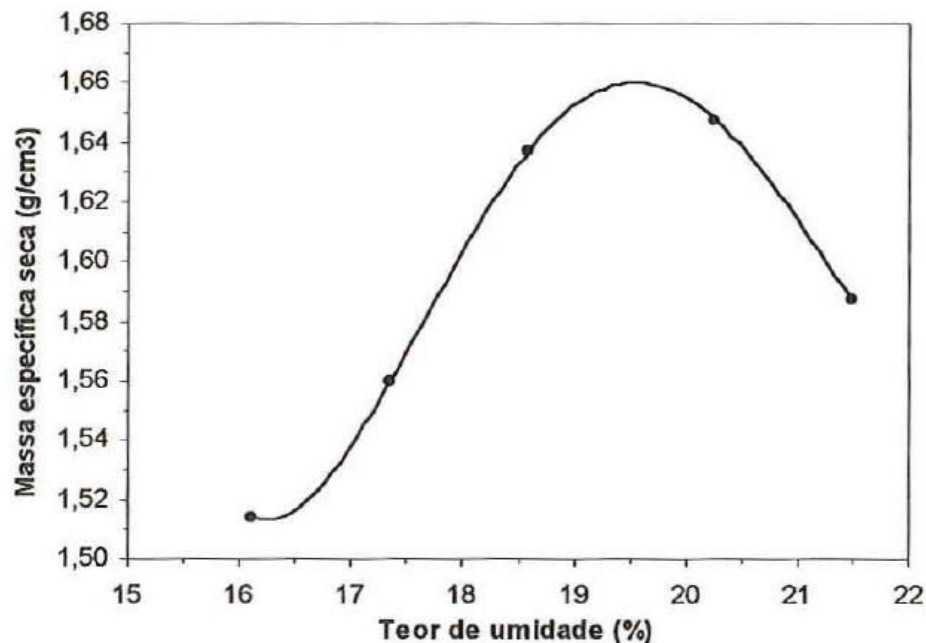
Amostra	Energia	$\gamma_d^{m\acute{a}x}$	W _{ót}	ISC com imersão (%)			Expan- são	ISC sem imersão
		kg/m ³	(%)	W _{cap} (%)	GC ¹ (%)	ISC (%)	(%)	(%)
CI 01	Normal	1.812	15,6	15,2	101,9	11,4	0,18	13
CI 02		1.798	15,2	14,9	101,7	10,5	0,13	
CI 03		1.804	15,1	15,5	99,5	11,3	0,81	21
CI 04		1.803	15,7	15,5	100,6	11,7	0,21	
Média		1.804	15,4	-	-	11	0,33	17
CI 05	Interme- diária	1.910	13,3	13,3	98,1	21,0	0,30	31
CI 06		1.920	13,3	13,0	100,5	20,0	0,15	
Média		1.915	13,3	-	-	21	0,23	
CI 07	Modifi- cada	2.052	11,5	12,4	98,1	25,5	0,06	54
CI 08		2.032	12,0	12,4	98,2	25,3	0,01	
Média		2.042	11,8	-	-	25	0,04	

Fonte: Zago, 2016

Os estudos de Gonçalves (1999) corroboraram as características esperadas de um solo fino, em ensaios de solo argiloso com o emprego de energia de compactação correspondente ao Proctor Normal, tal solo apresentou grau de compactação 100% e

um teor de umidade relativamente alto, em torno de 19,5%, fator este esperado, uma vez que argilas possuem granulometria reduzida e por conseguinte tendem a possuir maior superfície específica. Foi também aferida uma massa específica seca máxima de 1,660 g/cm³, Figuras 12 e 13.

Figura 12 – Curva de compactação de um solo argiloso mediante energia de compactação Proctor Normal.



Fonte: Gonçalves, 1999

Figura 13 – Umidade ótima, massa específica seca máxima e CBR de solo argiloso mediante energia de compactação Proctor Normal.

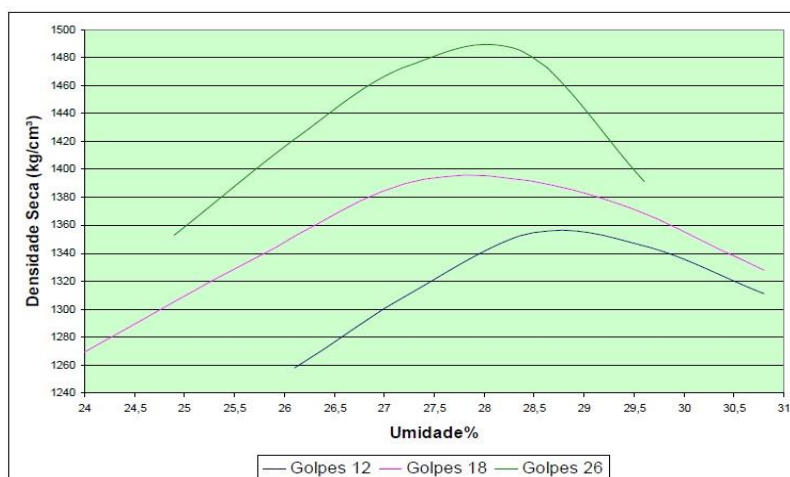
	w_{ot} (%)	$\rho_d \text{ máx}$ (g/cm ³)	CBR (%) para w_{ot}
Energia normal	19,5	1,660	22

Fonte: Gonçalves, 1999

Os parâmetros específicos de cada solo, após receber os esforços de compactação, influenciarão diretamente os resultados obtidos deste. Segundo Godoy *et al* (1996), os solos lateríticos, quando compactados, podem adquirir boa resistência e baixa permeabilidade, sem perda significativa de capacidade de suporte ao serem imersos em água.

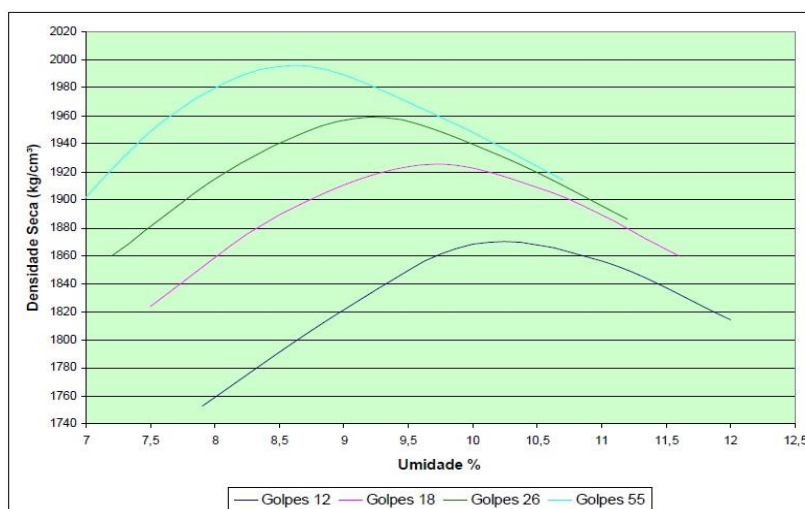
Zica (2010) ao analisar amostras de latossolo de textura argilosa e média constatou que ocorreram acréscimos significativos de densidade do solo em relação as energias de compactação Internormal e Modificada. Paralelo a isto, verificou que em solos relativamente finos, a energia de compactação Proctor Internormal apresenta melhoria na densidade do solo com uma pequena variação na redução da umidade e que este poderia vir a sofrer uma diminuição severa de densidade, em função de seu teor de finos que seriam tomados pela água em caso de ocorrência de aumento de umidade no ramo úmido. Seus estudos corroboram com a tese de que com o acréscimo de energia de compactação a densidade sofre incremento enquanto a umidade ótima decresce, Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Curva de compactação de um latossolo de textura argilosa.



Fonte: Zica (2010)

Figura 15 – Curva de compactação de um latossolo de textura média.



Fonte: Zica (2010)

Segundo Vargas (1978) ao tentar compactar-se um solo, o esforço de compactação será mais ou menos efetivo conforme sua granulometria e plasticidade. Para as areias puras, a compactação será totalmente ineficiente tornando necessária a utilização de outras técnicas. No caso de um solo arenoso, com uma pequena porcentagem de argila, a eficiência da compactação é grande. Já para uma argila muito plástica, o esforço de compactação fará com que a argila reflua, devido as suas propriedades plásticas, não havendo compactação eficiente, de um modo geral, para o mesmo esforço de compactação, atingem-se nos solos arenosos maiores valores de densidade aparente seca máxima sob menores umidades ótimas, do que nos solos argilosos.

Como pôde ser evidenciado, solos finos possuem tendência a apresentar menores densidades secas máximas, além do que, apresentam maior necessidade de controle de umidade devido à superfície específica superior a solos de granulometria maior.

3. MÉTODO

3.1. Caracterização da área de estudo

3.1.1. Empreendimento

O empreendimento, Figura 16, um loteamento residencial urbano, situado às margens da Av. Augusto Montenegro e da Av. Maracacuera, possui 934.157 m² de área e visa a implantação de um bairro planejado com a existência de três condomínios, com lotes residenciais e comerciais, que somados possuem 3115 lotes. A área possui nível topográfico elevado (~5m) em relação a via principal de acesso, tal qual, se comparado ao restante do entorno.

A empreendimento está dividido em 81 quadras, uma área institucional, uma ETE e uma ETA, que são interligados por 112 vias, sendo 22 vias principais e 90 vias secundária, que correspondem a 17,23% da área total. Vias estas que recebem como revestimento a pavimentação asfáltica (CAUQ), munido de subleito, reforço de subleito, sub-base e base.

As vias auxiliam o sistema de drenagem através da condução de águas pluviais por caminhamento superficial pelas sarjetas até dispositivos de captação, que somam 958 dispositivos de drenagem ao longo das vias.

Figura 16: Vista aérea da área de estudo.



Fonte: Google Earth

3.1.2. Solo

A área de estudo encontra-se localizada em Icoaraci, distrito de Belém que possui uma grande variedade de solos devido à sua localização na região amazônica.

Na área do empreendimento, bem como em toda região do nordeste paraense, existem 5 perfis predominantes de solo, que são provenientes de rochas sedimentares, constituídos por Argilitos (Latossolo Amarelo textura muito argilosa), Arenitos Argilosos (latossolo Amarelo textura média), Argilitos e Arenitos (latossolo vermelho), Podzólico Amarelo e Filito-clorita-xisto (latossolo vermelho-amarelo textura argila cascalhenta). (EMBRAPA, 1993).

Os solos do município de Belém têm as mesmas características dos solos da região Bragantina, pertencentes às unidades Latossolo Amarelo Distrófico de textura média, Solo Concrecionários Lateríticos Indiscriminados de textura indiscriminada, Gleieutrófico e distrófico, solos aluviais eutróficos, texturas indiscriminadas. (SEGEPI, 2020).

Como solo predominante, o Latossolo Amarelo é um solo ácido e profundo, com baixa fertilidade natural, sendo um solo típico da região amazônica, onde o clima quente e úmido acelera o processo de lixiviação, removendo nutrientes do solo (EMBRAPA, 2018).

Apresenta cor amarelada, é uniforme em perfil profundo, de 1,50 m de espessura. Tratam-se de solos envelhecidos, ácidos a fortemente ácidos e de boa drenagem, apesar de apresentarem uma textura argilosa ou muito argilosa, possuindo uma elevada coesão dos agregados, e apresentam boas condições físicas de retenção de umidade e boa permeabilidade (IDESP, 1971).

Em resumo Belém possui solos tropicais, fator este relacionado ao seu clima tropical. Em tais regiões, ocorre o processo de laterização, no qual os solos desenvolvem uma camada endurecida conhecida como laterita. Essa camada pode ser rica em ferro e alumínio, porém, pobre em nutrientes. São resultantes do intemperismo oriundo das chuvas recorrentes que transformam a parte superior do subsolo, apresentando coloração típica amarela, vermelha, marrom e alaranjada que também promovem, conseqüentemente, a lixiviação.

3.1.3. Clima

Por estar situada próximo à linha do equador, a área de estudo possui acesso a uma grande quantidade de energia durante todo o ano, o que alimenta processos convectivos e sistemas meteorológicos de diferentes escalas, provocando uma precipitação média anual de cerca de 2300 mm, com algumas áreas apresentando

precipitação superior a 3000 mm. Já entre esses picos, é possível encontrar áreas com níveis mínimos de precipitação de 1600 mm (CIRINO, 2017).

Ao analisar o índice pluviométrico, é possível classificar a região em dois períodos sazonais conhecidos popularmente como "inverno" (o período mais chuvoso) e "verão". Isso ocorre porque a região apresenta uma ausência de amplitude térmica significativa (apenas 1,1°C), o que impede a divisão do ano em estações distintas.

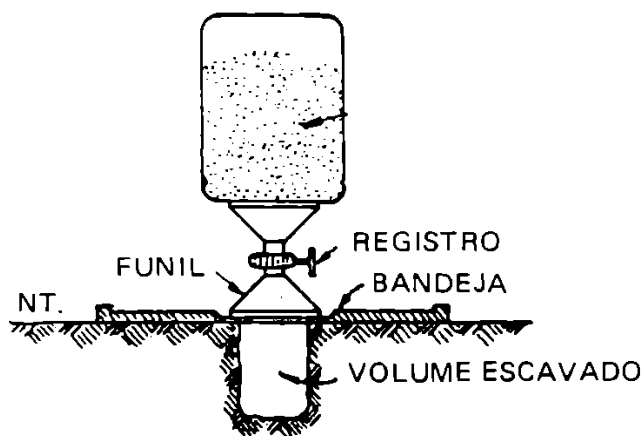
Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a média pluviométrica mensal registrada em Belém no ano de 2022 foi de 308,66mm, cujo índice mínimo de 113mm se deu em julho e o máximo ocorrendo em março 528,8mm.

Em 2022 os maiores volumes de chuvas registrados pelas estações meteorológicas do INMET ocorreram em Belém (PA) com 3.683 milímetros (mm) e Teresópolis (RJ) com 3.158 mm, enquanto a média nacional anual registrada no ano em questão foi de apenas 934mm. (INMET, 2023)

3.2. Descrição dos procedimentos de controle tecnológico

A coleta de amostras de solo compactado para geração de dados foi feita através de procedimento conforme orientado pela DNER-ME 092/94, através do método do frasco de areia, ilustrado na Figura 17, onde procedeu-se da seguinte forma: logo após a finalização da compactação, foi selecionado o local de retirada da amostra, o laboratorista posicionou a bandeja com furo central em uma superfície plana, com o auxílio de uma pá de mão e um martelo, escavou-se dentro do perímetro do furo central da bandeja a uma profundidade de 15cm, tomando cuidado para que o material retirado da cavidade permanecesse na bandeja, esse material foi então armazenado em um saco plástico de modo a preservar momentaneamente a umidade da amostra.

Figura 17: Posicionamento do conjunto funil e frasco no método do frasco de areia;



Fonte: Caputo, 1988

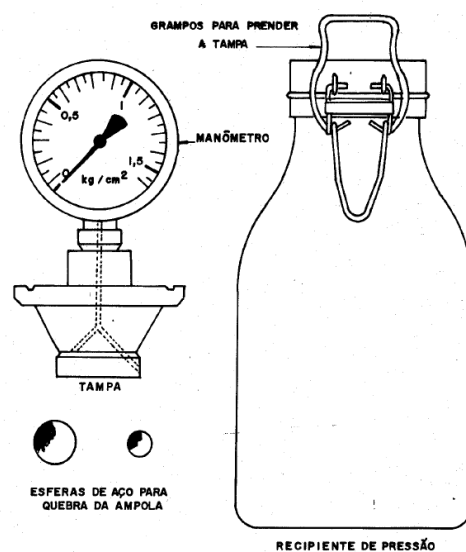
Com a escavação finalizada e o material coletado, posicionou-se o conjunto frasco-funil sobre o furo central da bandeja alinhando com o rebaixo da mesma, já com o conjunto devidamente posicionado foi realizada a abertura do registro do frasco de areia e aguardou-se até que cessasse a movimentação de descida da areia, em seguida foi fechado o registro e retirado o conjunto para pesagem. Com o auxílio de uma balança de 1kg, sensível a 0,1g, foi obtido o valor da massa do solo escavado, massa inicial do frasco, massa final do frasco, massa do funil e massa específica da areia e por fim, foi calculada a densidade da amostra através da Fórmula 2:

$$\gamma = \frac{\text{massa do solo escavado}}{(\text{massa inicial do frasco} - \text{massa final do frasco} - \text{massa do funil})} \quad (2)$$

$$\mu_{\text{areia}}$$

Aferida a massa específica do solo, foi dado seguimento a aferição da umidade da amostra que ocorreu conforme orienta a DNER-ME 052/94, através do método do Speedy, ilustrado na Figura 18.

Figura 18: Conjunto do aparelho “Speedy” para determinação de umidade.



Fonte: DNIT, 1994

O Speedy trata-se de um conjunto constituído por um reservatório metálico fechado que se comunica com um manômetro destinado a medir a pressão interna, onde procedeu-se da seguinte forma: montou-se a balança constante no kit do Speedy, pesando uma amostra de 10g, com o auxílio de uma espátula a amostra foi despejada dentro da câmara e com o auxílio de um pincel de cerdas macias fez-se a transferência das partículas remanescentes, foram então introduzidas à câmara duas esferas metálicas e em seguida a ampola de carbureto de cálcio, com o devido cuidado para que a mesma não rompesse precocemente. Com todos os insumos posicionados foi feita a acoplagem do manômetro na parte superior do conjunto e agitou-se o mesmo para que ocorresse o rompimento da cápsula e liberação do carbureto de cálcio. Ao ser liberado dentro da câmara, o CaC_2 reagiu com a água presente na amostra de solo gerando uma pressão registrada pelo manômetro. Essa leitura foi comparada a uma tabela presente no equipamento que associa valores de pressão a determinados valores de umidade.

Entretanto, é válido frisar que, são previstos em norma outros dois métodos para coleta de dados de massa específica e umidade in situ, o método do balão de borracha regido pela DNER-ME 036/94 e o método expedito do álcool regido pela DNER-ME 088/94, respectivamente.

Finalizados os procedimentos de coleta de dados in situ pela empresa, os mesmos foram transcritos para fichas de controle, Figura 19. Controle este cujo acesso foi cedido através de solicitação à construtora para que fosse realizado o trabalho de tratamento estatístico.

Figura 19: Ficha de controle tecnológico.

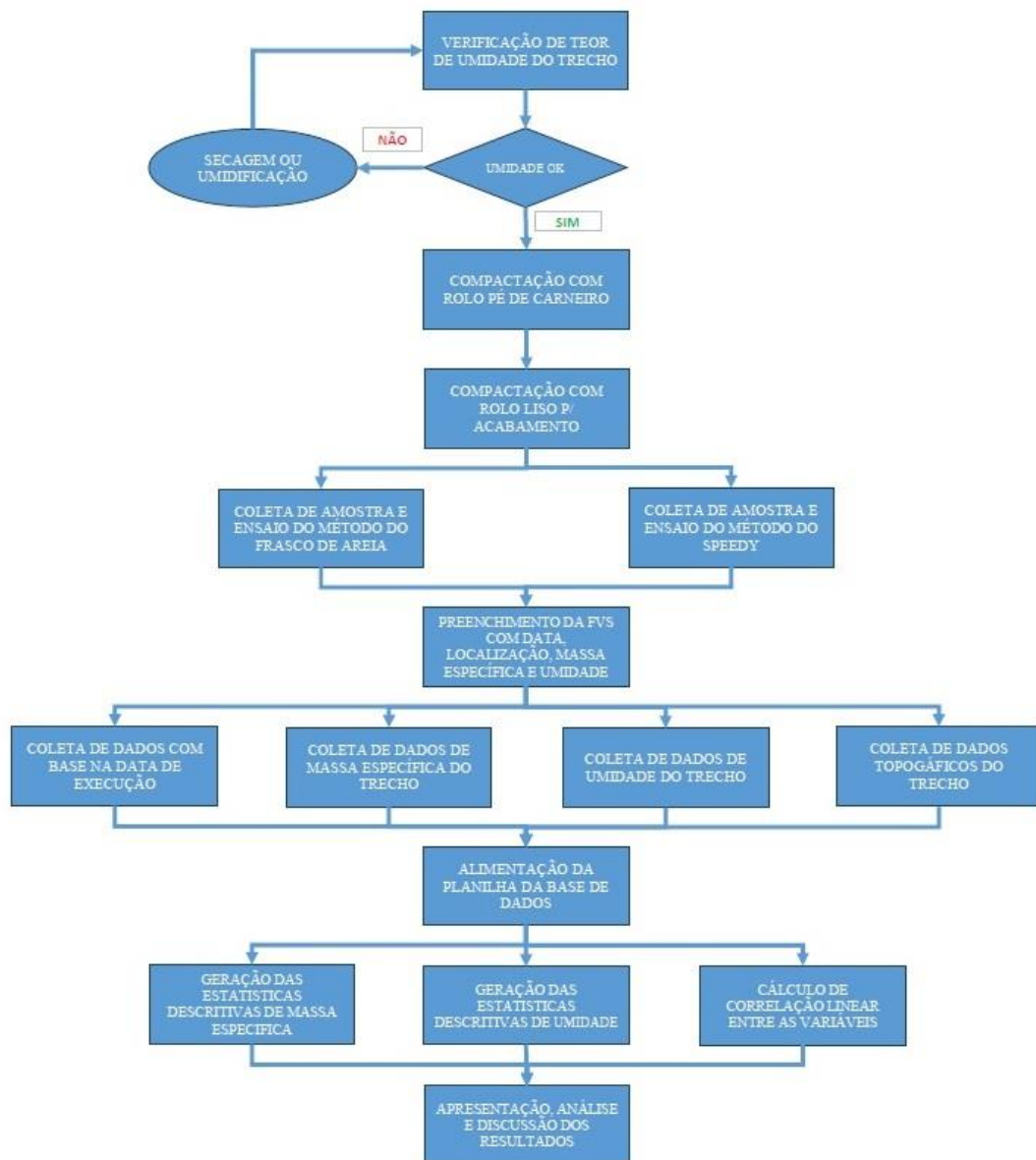
RELATÓRIO DE CAMPO TERRAPLANAGEM TESTE DE CARGA		ESTABELECIDO EM	FOLHA
		20/07/2002	18
ELABORADO POR: CENTRO DE QUALIDADE - EQUIPE PATRONAGEM		REVISADO EM	
REVISADO POR: ENGENHEIRO - EQUIPE DE PATRONAGEM		REVISADO EM	
OBRA:	DADOS DO TESTE	TESTE 1	TESTE 2
DATA:	13/09/22		
LOCAL:	SETOR AMARELO, ALV. PRINCIPAL 01 B LADO DIREITO		
CAMADA:	SUBLEITO		
MATERIAL:	LATERITA		
ESTACA:	01 A 31 310 METROS		
TRECHO:	ENTRE AS ROTATÓRIAS 02 E 03		
Nº FICHAS	Nº	06	
DENS MAX	DM	2120	
UMIDADE ÓTIMA	IP _{ab}	10,4	
PARECER TÉCNICO :			
TESTE DE CARGA APROVADO PELO CONTROLE TECNOLÓGICO E CONTROLE DE QUALIDADE DA OBRA.			
LABORATORISTA		ENCARREGADO	GERENTE DO SERVIÇO / ITE DO SERVIÇO
			
		 Laboratório de Controle de Qualidade CREA: 12483/2012-6 Gerente	
Certificação da Anotação			

Fonte: Administração do empreendimento.

3.3. Descrição do método de tratamento de dados

Uma sequência de ações ocorre em função da geração e tratamento de dados de controle tecnológico, ações estas descritas na Figura 20 na forma de um fluxograma:

Figura 20: Fluxograma de método de trabalho.



Os dados de base foram gerados inicialmente em função das informações contidas nas fichas de controle, tais como: data de compactação, massa específica aparente e umidade ótima. Complementar a isto foram coletados dados de cotas topográficas junto ao *Topographic*, utilizando como referência a localização contida nas fichas de controle e de mapa setorizado do empreendimento, e dados de chuva, número de dias com chuva anteriores a compactação e volume acumulado nestes, através do controle meteorológico do INMET, buscando dados de estações meteorológicas em função das datas de compactação, originando a base de dados para início do tratamento estatístico.

3.3.1. Parâmetros de tratamento estatístico

Na análise de dados estatísticos buscou-se obter valores que representassem um conjunto de dados. Valores estes, obtidos com o intuito de sintetizar da melhor maneira possível, o comportamento do conjunto que o originou. O tratamento de dados consiste na organização das informações coletadas de modo a favorecer a observação de padrões ausentes, ocorrentes ou recorrentes. Tal organização permitiu analisar a influência de uma variável em relação à outra de forma que associações pudessem ser feitas e administradas conforme a necessidade vigente.

Dentro do tratamento de dados foram adotadas medidas de posição, dentre estas, as medidas de tendência central são as mais interessantes, são elas: a Média, a Moda e a Mediana. Estas recebem tal denominação devido ao fato dos dados observados se agruparem em torno dos valores centrais da base de informações.

A Média Aritmética da Amostra pode ser obtida adotando a Fórmula 3:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} \quad (3)$$

onde:

$\bar{X}$ = é a medida aritmética da amostra;

X_i = são os valores que a variável x assume;

n = o número de valores da série de dados.

A Moda é definida como valor ocorrente em maior frequência dentro de um grupo de dados.

A Mediana trata-se de uma medida de posição cujo número divide um conjunto de dados em duas partes iguais. Esta se localizará no centro de um conjunto de números ordenados segundo uma ordem de grandeza. Para obtenção do elemento mediano:

- Se N for ímpar a mediana se dará pela Fórmula 4:

$$P = \frac{N+1}{2} \quad (4)$$

- Se N for par a mediana se dará pela média aritmética dos termos definidos pelas Fórmulas 5 e 6:

$$P_1 = \frac{N}{2} \quad (5)$$

$$P_2 = \frac{N}{2} + 1 \quad (6)$$

Dentro do tratamento estatístico descritivo também é levada em conta a questão da variabilidade de valores dos dados obtidos, com base nisso foram adotadas as medidas de dispersão: desvio padrão (S) e coeficiente de variação (CV). Sendo o desvio-padrão definido pela Fórmula 7 e o coeficiente de variação pela Fórmula 8:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{X})^2}{N}} \quad (7)$$

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (8)$$

Por fim, foi feita a análise de correlação linear entre as variáveis através do coeficiente de correlação de Pearson (r), definido pela Fórmula 9:

$$r = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{n\sum y^2 - (\sum y)^2}} \quad (9)$$

Definidos os parâmetros de tratamento estatístico descritivo, temos:

- a) Os dados de massa específica e umidade aqui apresentados foram obtidos através de controle tecnológico feito por empresa especializada contratada pela construtora executora da obra, as cotas registradas foram coletadas com base nas fichas de controle tecnológico e através do site *Topographic* e os dados diários de chuva foram coletados com base nos dados gerados pelas estações de controle do INMET, tomando por data base de referência as constantes nas fichas de verificação de serviço;
- b) Usando de estatística descritiva foram tratados os dados de massa específica visando calcular a média, a moda, o desvio-padrão, o coeficiente de variação e a montagem de histograma dos dados;
- c) Usando de estatística descritiva foram tratados os dados de umidade visando calcular a média, a moda, o desvio-padrão, o coeficiente de variação e a montagem de histograma dos dados;
- d) Com base na correlação linear de Pearson, buscou-se fazer uma verificação se os pares: massa específica x cota, massa específica x chuva nos dias anteriores, umidade x cota e umidade x chuva nos dias anteriores, são correlacionados e caso sejam, se estão positivo ou negativamente correlacionados.

4. RESULTADOS

Na Tabela 1, segue a planilha de base de dados a partir da qual teve início o tratamento estatístico.

Tabela 1: Base de dados geradas através de consulta a FC's, *Topographic* e INMET.

Nº do trecho	Data de compactação	Massa específica "in situ" (g/cm ³)	Umidade ótima "in situ" (%)	Cota (m)	Chuva nos 7 dias anteriores à compactação (nº de dias)	Chuva acumulada nos 7 dias anteriores à compactação (mm)
1	13/09/2022	2,120	10,4%	24	4	44,8
2	15/09/2022	2,125	7,8%	23	3	35,8
3	15/08/2022	2,120	10,4%	23	1	1,8
4	15/08/2022	2,021	10,4%	24	1	1,8
5	02/09/2022	2,120	10,4%	23	4	80,4
6	01/09/2022	2,120	10,4%	23	4	58,0
7	11/08/2022	2,021	10,4%	26	3	3,6
8	26/08/2022	2,120	10,4%	27	6	75,2
9	29/08/2022	2,120	10,4%	27	4	65,4
10	07/08/2022	2,021	10,4%	24	5	11,8
11	10/08/2022	2,021	10,4%	24	3	3,6
12	22/07/2022	1,978	9,0%	27	4	25,8
13	15/08/2022	2,120	10,4%	25	1	1,8
14	12/07/2022	2,120	10,4%	26	5	25,0
15	09/08/2022	2,120	10,4%	25	4	5,2
16	25/08/2022	2,120	10,4%	26	5	67,4
17	05/09/2022	2,120	10,4%	26	3	73,2
18	22/09/2022	2,120	10,4%	27	4	56,8
19	24/09/2022	2,120	10,4%	27	3	53,6
20	12/10/2022	2,120	10,4%	20	4	102,6
21	12/10/2022	2,120	10,4%	20	4	102,6
22	14/09/2022	2,120	10,4%	23	3	20,6
23	11/09/2022	2,120	10,4%	23	5	50,8
24	11/10/2022	2,120	10,4%	23	5	111,6
25	20/10/2022	2,120	10,4%	23	5	13,2
26	20/10/2022	2,110	10,4%	23	5	13,2
27	21/10/2022	2,120	10,4%	23	5	13,2
28	18/07/2022	1,978	9,0%	25	3	45,0
29	21/07/2022	1,978	9,0%	22	4	51,6
30	22/07/2022	1,978	9,0%	22	4	25,8

Fonte: Autor

Tabela 1: Base de dados geradas através de consulta a FC's, *Topographic* e INMET.

Nº do trecho	Data de compactação	Massa específica "in situ" (g/cm³)	Umidade ótima "in situ" (%)	Cota (m)	Chuva nos 7 dias anteriores à compactação (nº de dias)	Chuva acumulada nos 7 dias anteriores à compactação (mm)
31	21/07/2022	1,978	9,0%	20	4	51,6
32	22/07/2022	1,978	9,0%	20	4	25,8
33	14/07/2022	1,978	9,0%	19	4	12,0
34	27/07/2022	2,120	10,4%	20	2	1,4
35	08/08/2022	2,120	10,4%	23	4	6,4
36	18/08/2022	2,021	10,4%	25	2	23,4
37	11/08/2022	2,021	10,4%	25	3	3,6
38	11/08/2022	2,021	10,4%	24	3	3,6
39	28/07/2022	2,120	10,4%	25	1	0,2
40	04/08/2022	2,120	10,4%	25	4	10,2
41	08/08/2022	2,120	10,4%	25	4	6,4
42	29/07/2022	2,120	10,4%	24	0	0
43	16/11/2022	2,125	7,8%	11	4	72,4
44	15/11/2022	2,120	10,4%	11	5	91,6
45	25/09/2022	2,120	10,4%	24	3	53,6
46	31/10/2022	2,120	10,4%	22	3	32,4
47	13/11/2022	2,125	7,5%	18	6	110,2
48	13/10/2022	2,120	10,4%	22	3	48,0
49	09/11/2022	1,829	7,4%	23	5	148,8
50	28/11/2022	2,125	7,8%	23	4	67,0
51	09/11/2022	1,829	7,4%	22	5	148,8
52	28/11/2022	2,125	7,8%	22	4	67,0
53	13/11/2022	2,120	10,4%	22	6	110,2
54	24/09/2022	2,120	10,4%	21	3	53,6
55	12/09/2022	2,125	10,4%	21	5	50,8
56	07/12/2022	2,120	10,4%	24	6	100,4
57	13/11/2022	2,125	7,8%	22	6	110,2
58	13/11/2022	2,125	7,8%	24	6	110,2
59	01/11/2022	2,120	10,4%	23	3	27,4
60	22/11/2022	2,120	10,4%	23	4	48,8

Fonte: Autor

Sem tratamento estatístico em um primeiro momento, é possível notar a amplitude dos valores de massa específica aparente e umidade ótima, oscilação relativamente baixa nos valores de massa específica, uma variação razoável nos valores de umidade ótima, uma amplitude relativamente alta nos valores de cota topográfica enquanto nos dados de dias de chuva e volume notou-se considerável variabilidade de valores.

4.1. Resultados de massa específica aparente (μ)

Dando seguimento ao tratamento de dados, foram obtidos os valores abaixo descritos, na Tabela 2, para a massa específica aparente do solo.

Tabela 2: Valores de medidas centrais e de dispersão aferidos para a massa específica aparente do solo.

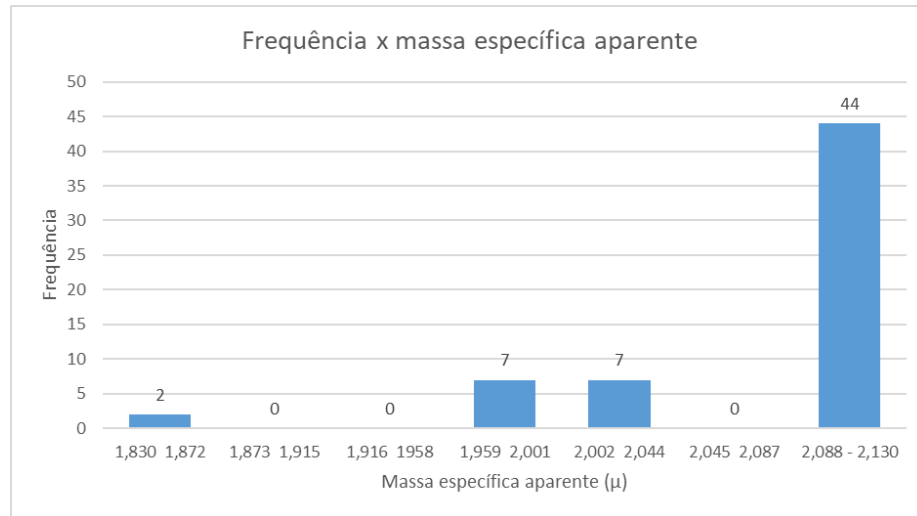
MASSA ESPECÍFICA APARENTE (μ)				
MÉDIA (g/cm ³)	MEDIANA (g/cm ³)	MODA (g/cm ³)	DESVIO-PADRÃO (g/cm ³)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
2,083	2,120	2,120	0,070	3,372

Fonte: Autor

Na tabela acima é possível observar a proximidade dos valores das medidas de tendência central, tal detalhe, caracteriza que a série de dados não possui valores discrepantes, já que estes causariam grandes disparidade no valor atribuído a média em relação as demais medidas.

Utilizando de ferramenta gráfica efetuou-se a plotagem da frequência por faixas de valores dos dados de massa específica aparente tratados, conforme visto na Figura 21.

Figura 21: Representação gráfica da frequência de valores aferidos para a massa específica aparente do solo por classe.

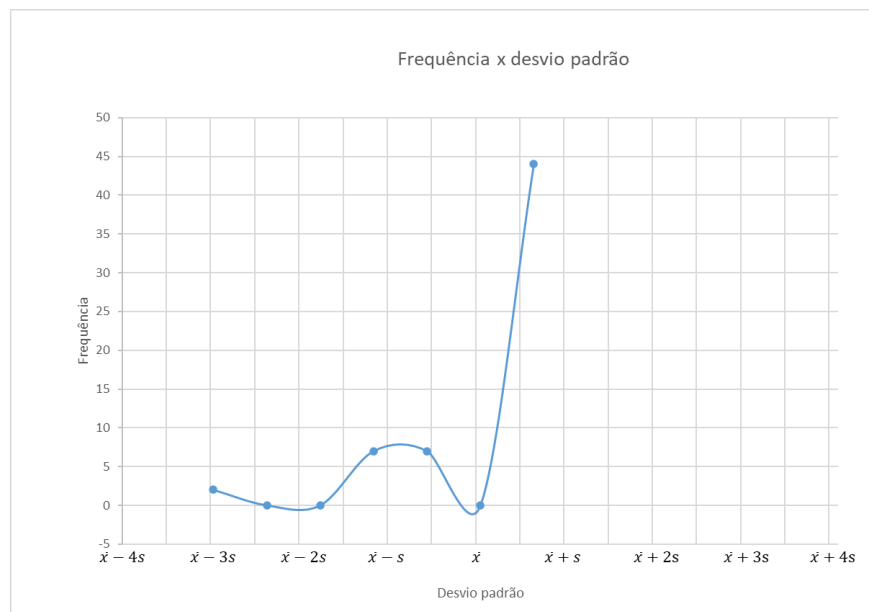


Fonte: Autor

Através da análise visual do gráfico é possível observar a distribuição assimétrica da sequência de dados, onde, em torno de 73% dos dados estão acima dos valores das medidas centrais, por conseguinte 27% estão abaixo destas.

Na Figura 22, temos a frequência em função do desvio padrão.

Figura 22: Representação gráfica da frequência de valores aferidos para a massa específica aparente do solo.



Fonte: Autor

A partir do gráfico disposto acima, é possível observar como a série se distribui em função do desvio padrão. Consta-se que o intervalo $\bar{x} \pm s$ contém, aproximadamente, 96% de todas as observações amostrais.

4.2. Resultados de umidade ótima ($h_{ót}$)

Por conseguinte, foram obtidos os valores descritos na Tabela 3, para a umidade ótima do solo.

Tabela 3: Valores de medidas centrais e de dispersão aferidos para a umidade do solo.

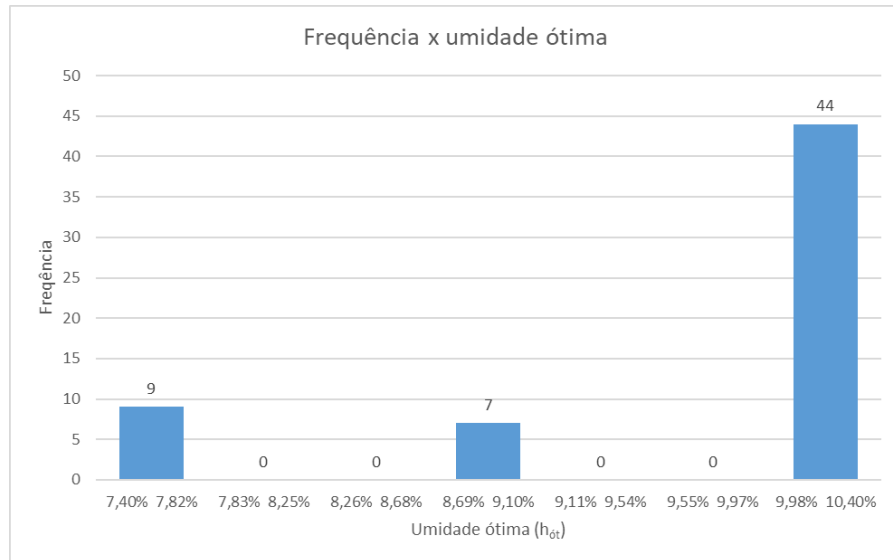
UMIDADE ÓTIMA ($h_{ót}$)				
MÉDIA (%)	MEDIANA (%)	MODA (%)	DESVIO-PADRÃO (%)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
9,83	10,40	10,40	1,01	10,27

Fonte: Autor

Na tabela acima é possível observar um afastamento do valor da média em relação as demais medidas de tendência central, tal detalhe caracteriza que a série de dados possui valores discrepantes, e estes causam disparidade no valor atribuído a média em relação as demais medidas. Também é possível constatar que os resultados de umidade ótima tiveram maior variabilidade em relação aos resultados de massa específica aparente.

Utilizando de ferramenta gráfica efetuou-se a plotagem da frequência por faixas de valores dos dados de umidade ótima tratados, conforme visto na Figura 23.

Figura 23: Representação gráfica da frequência de valores aferidos para a massa específica aparente do solo.

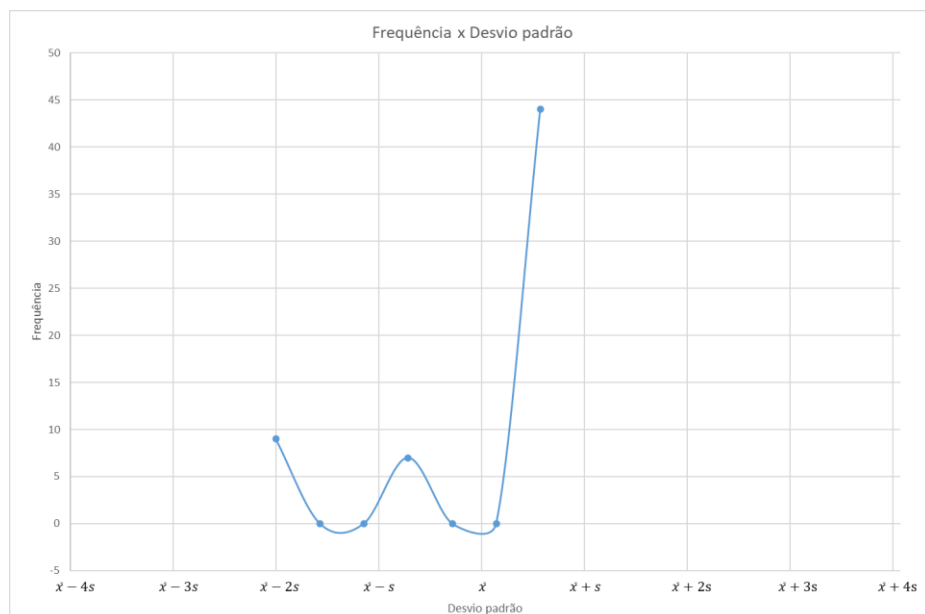


Fonte: Autor

Através da análise visual do gráfico presente na Figura 23 é possível observar também uma distribuição assimétrica da sequência de dados, onde, em torno de 73% dos dados estão acima dos valores das medidas centrais, por conseguinte 27% estão abaixo destas.

Na Figura 24, temos a frequência dos dados de umidade em função do desvio padrão.

Figura 24: Representação gráfica da frequência de valores aferidos para a massa específica aparente do solo.



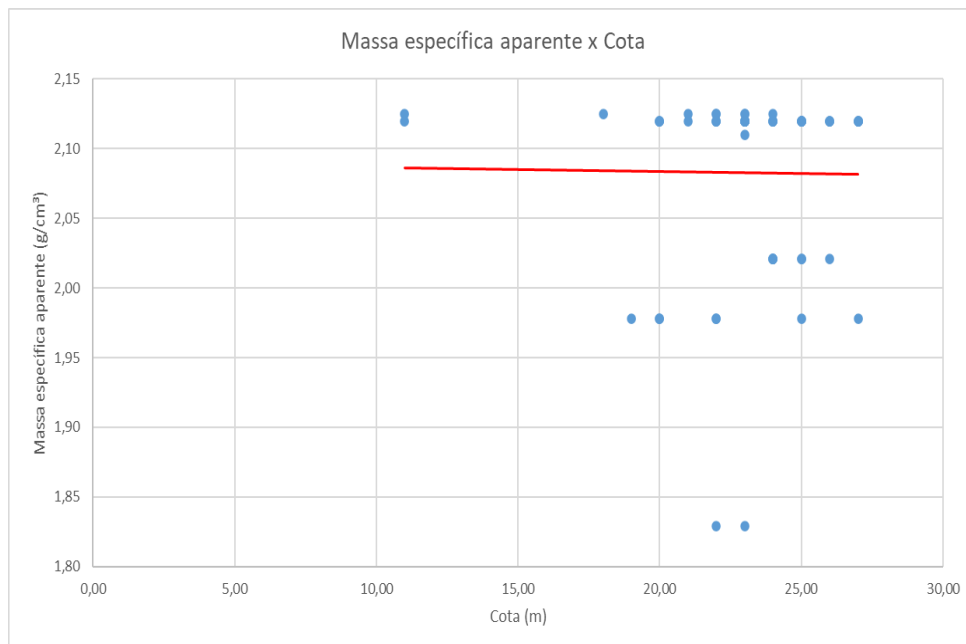
Fonte: Autor

A partir do gráfico disposto, é possível observar como a série se distribui em função do desvio padrão. Consta-se que o intervalo $\bar{x} \pm s$ contém, aproximadamente, 85% de todas as observações amostrais.

4.3. Correlação de variáveis

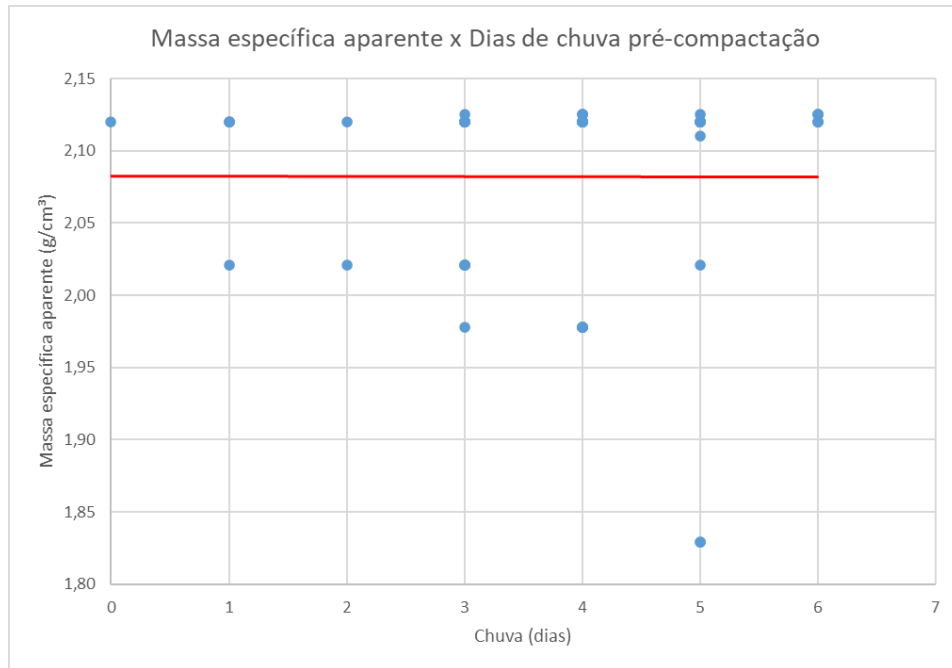
Como etapa final do tratamento estatístico de dados, segue a verificação de correlação entre as variáveis até então apresentadas. Conforme visto na Figura 25, 26 e 27, estão dispostos os valores de massa específica aparente em função da cota do terreno, do número de dias de chuva antes da compactação e dos volumes de chuva em tais dias, respectivamente.

Figura 25: Gráfico de dispersão com linha de tendência dos valores de massa específica aparente em função da cota do terreno.



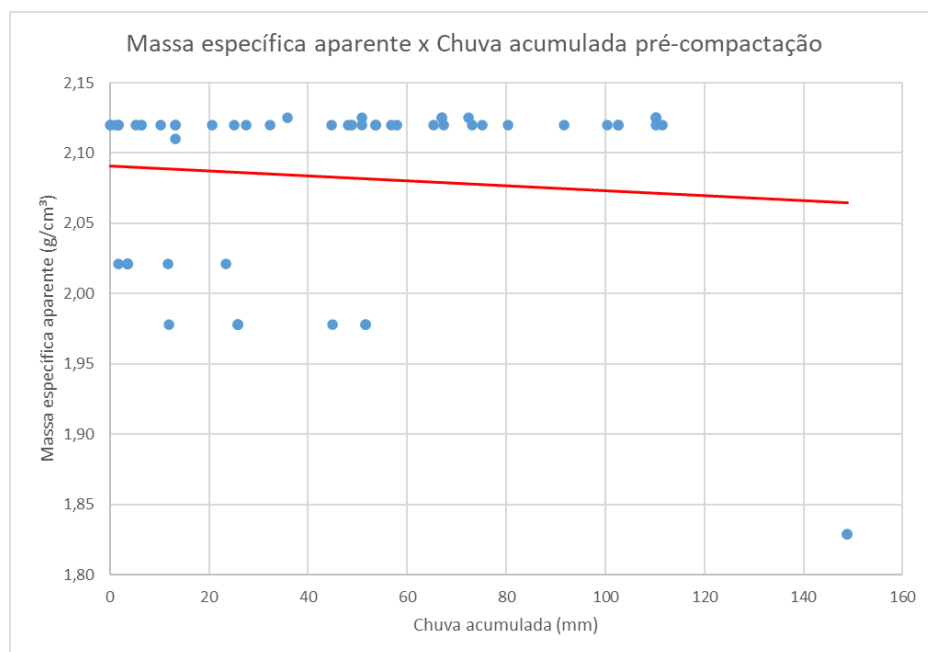
Fonte: Autor

Figura 26: Gráfico de dispersão com linha de tendência dos valores de massa específica aparente em função dos dias de chuva antes da compactação.



Fonte: Autor

Figura 27: Gráfico de dispersão com linha de tendência dos valores de massa específica aparente em função do volume de chuva acumulada antes da compactação.



Fonte: Autor

As representações gráficas acima, visualmente demonstram que a massa específica aparente não é influenciada linearmente pela cota do terreno, pelo número de dias em que ocorreu chuva ou pelo volume de chuva acumulado nestes dias antes da compactação. Para reforço do que se apresenta visualmente, na Tabela 4, estão dispostos os valores de correlação linear para os pares verificados.

Tabela 4: Valores de correlação linear entre massa específica aparente e as variáveis.

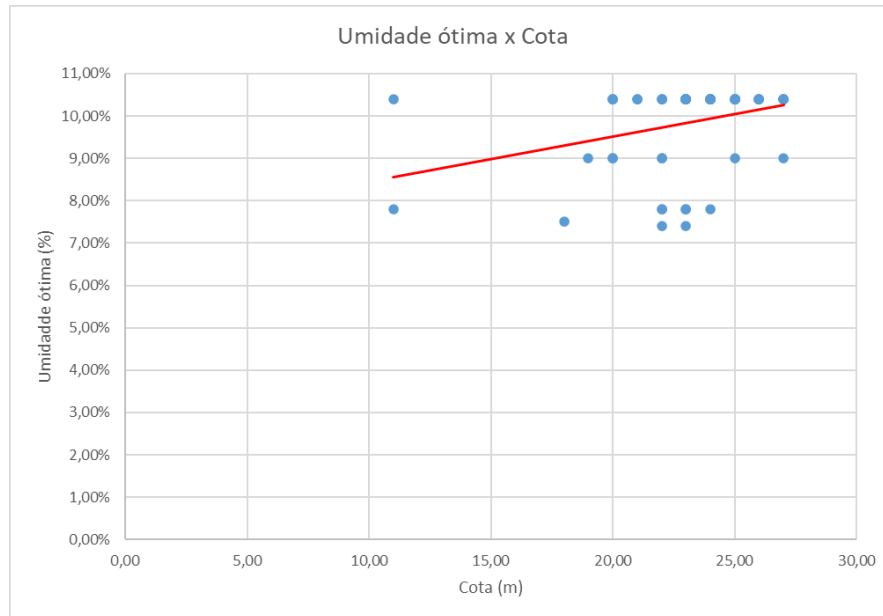
	Massa Específica Aparente
Cota do terreno	-0,01
Chuva (dias)	0,00
Chuva (mm)	-0,10

Fonte: Autor

Conforme exposto acima, a massa específica aparente é muito fracamente influenciada linearmente pela cota do terreno e pelo número de dias de chuva que antecedem a compactação, enquanto que, é muito fracamente influenciada negativamente em relação a chuva acumulada nos dias que antecedem a compactação.

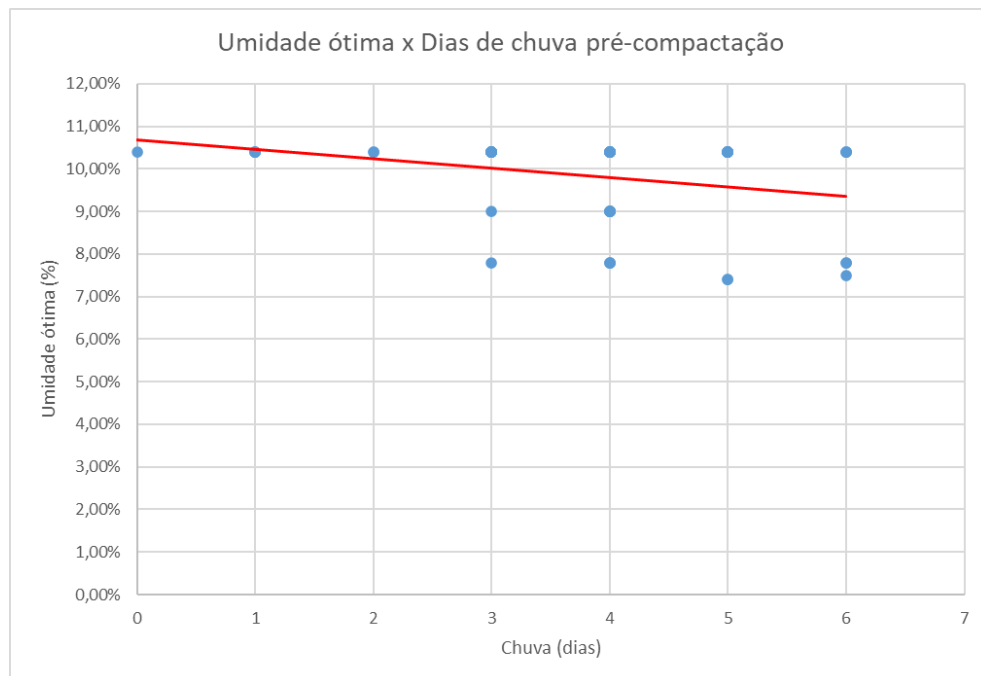
Conforme ilustrado na Figura 28, 29 e 30, os valores dispostos de umidade ótima em função da cota do terreno, do número de dias de chuva antes da compactação e dos volumes de chuva em tais dias, respectivamente.

Figura 28: Gráfico de dispersão com linha de tendência dos valores de umidade ótima em função da cota do terreno.



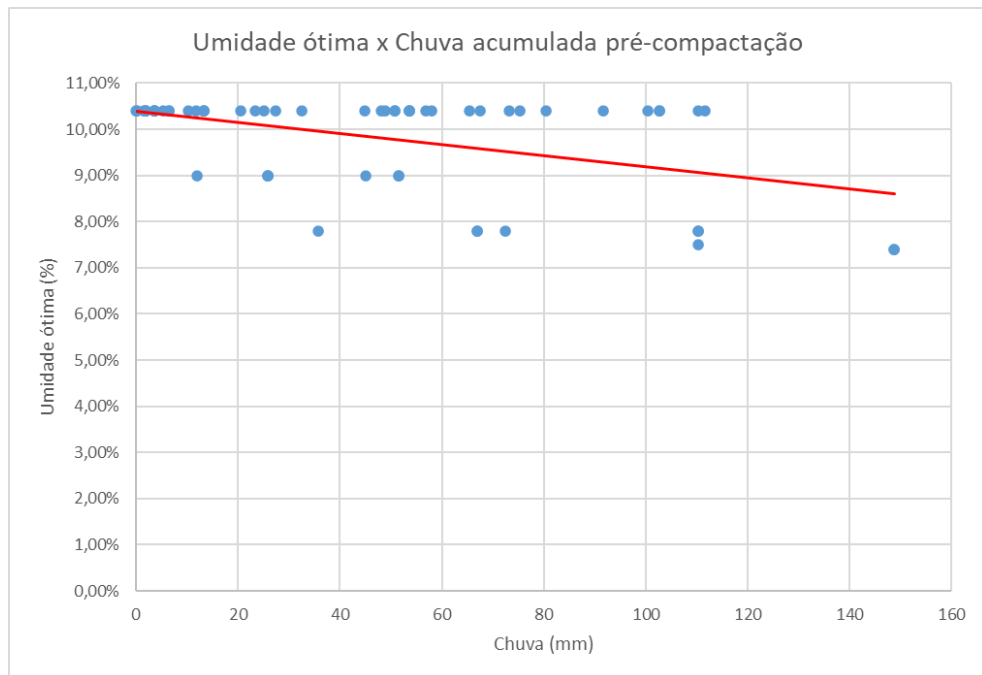
Fonte: Autor

Figura 29: Gráfico de dispersão com linha de tendência dos valores de umidade ótima em função dos dias de chuva antes da compactação.



Fonte: Autor

Figura 30: Gráfico de dispersão com linha de tendência dos valores de umidade ótima em função do volume de chuva acumulada antes da compactação.



Fonte: Autor

As representações gráficas acima, visualmente demonstram que a umidade ótima é muito fracamente a moderadamente influenciada linearmente pela cota do terreno, pelo número de dias em que ocorreu chuva ou pelo volume de chuva acumulado nestes dias antes da compactação. Buscando corroborar o que se apresenta visualmente, na Tabela 5, estão dispostos os valores de correlação linear para os pares verificados.

Tabela 5: Valores de correlação linear entre massa específica aparente e as variáveis.

	Umidade Ótima
Cota do terreno	0,32
Chuva (dias)	-0,29
Chuva (mm)	-0,47

Fonte: Autor

Conforme exposto acima, a umidade ótima é fracamente influenciada positivamente, fracamente influenciada negativamente pelo número de dias de chuva

que antecede a compactação e moderadamente influenciada negativamente pela chuva acumulada nos dias que antecede a compactação.

Conforme demonstrado estatisticamente, a massa específica aparente do solo da área de estudo se apresentou praticamente nula, no que tange a influência linear das variáveis analisadas, havendo apenas uma fraquíssima influência das chuvas acumuladas sobre a resistência do maciço terroso. E conforme demonstrado estatisticamente a umidade ótima apresentou uma fraca correlação linear positiva em relação a cota do terreno, uma fraca correlação linear negativa em relação aos dias de chuva que antecede a compactação e uma moderada correlação linear negativa em relação a chuva acumulada nos dias antecedentes a compactação.

Apesar de no máximo ter havido correlação moderada entre os pares verificados, a umidade ótima se apresentou bastante suscetível a influência linear das variáveis quando comparada a massa específica aparente.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

O conhecimento do comportamento dos materiais empregados em construções mediante fatores diversos é uma prerrogativa e uma obrigatoriedade da Engenharia Civil. O objetivo deste trabalho está atrelado justamente a estes fatores e foi o de avaliar o nível de influência de variáveis topográficas e climáticas na densidade e na umidade ótima de maciços terrosos, mais especificamente, na região de Belém.

Os objetivos foram alcançados, tornando evidente os níveis de influência ao qual um subleito compactado está sujeito em função, sobretudo, dos fatores climáticos que são uma característica marcante na região de estudo.

A seguir são apresentadas as conclusões referentes as análises de resultados, realizadas para o universo dos dois fatores para o qual se buscou investigar o grau de influência a que são ou não suscetíveis.

5.1. CONCLUSÕES

i) O par ordenado massa específica aparente x cota apresentou correlação linear negativa muito fraca, praticamente nula;

ii) O par ordenado massa específica aparente x chuva (dias) apresentou correlação linear nula;

iii) O par ordenado massa específica aparente x chuva (mm) apresentou correlação linear muito fraca;

iv) O par ordenado umidade x cota apresentou correlação linear positiva fraca;

v) O par ordenado umidade x chuva (dias) apresentou correlação linear negativa fraca;

vi) O par ordenado umidade x chuva (mm) apresentou correlação linear negativa moderada;

vii) O maciço terroso analisado demonstrou correlação linear quase nula no que cerne a influência da cota do terreno, dias de chuva antecedentes a compactação e chuva acumulada em tais dias na massa específica aparente do solo à massa específica aparente;

viii) O maciço terroso analisado demonstrou correlação linear fraca no que cerne a influência da cota do terreno, dias de chuva antecedentes a compactação e chuva acumulada em tais dias na massa específica aparente do solo à umidade;

ix) A ausência de correlação linear entre os pares citados acima não exclui que haja influência de um sobre o outro;

x) Os resultados de massa específica seca obtidos por Zica (2010) para um latossolo de textura média compactado sob energia Proctor Normal se aproximam dos valores verificados neste trabalho tal qual os valores de umidade ótima;

xi) Os valores de massa específica seca, relativamente baixos, e de umidade ótima, relativamente altos, verificados por Zago (2016) e Gonçalves (1999) para argissolos, servem de contraprova quanto a caracterização do solo objeto deste estudo;

xii) Devido a influência das variáveis verificadas, recomenda-se o uso de ferramentas para análise de previsibilidade meteorológica a fim de evitar a operacionalização em dias de chuva ou próximo a estes.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se ensaios em laboratório de solos a fim de avaliar (GC) grau de compactação, (Δh) desvio de umidade e efetuar uma caracterização precisa do solo estudado a fim de envolver outras variáveis à análise, como a granulometria, por exemplo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NORMA DNIT 137/2010- ES.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2018

EMBRAPA. Caracterização Físico-Hídrica de Cinco Perfis de Solo do Nordeste Paraense. 1993

IDESP. Cadernos Paraenses. Os Solos do Estado do Pará. 1971.

INMET – Portal do Instituto Nacional de Meteorologia, 2023

BALBO, José Tadeu. Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

BASTOS, T. X.; PACHECO, N. A; NECHET, D.; SÁ, T. D. de A. – Aspectos climáticos de Belém nos últimos cem anos – Embrapa Amazônia Oriental

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G; CERATTI, J.A.P; SOARES, J.B. – Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras, 2008

CAPUTO, Homero Pinto – Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988

CIRINO, L. S. Extremos Climáticos de Precipitação e a Urbanização em Belém-Pa. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

CRISPIM, F. A. - Compactação de solos: influência de métodos e de parâmetros de compactação na estrutura dos solos. Tese de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Minas Gerais, Viçosa, 2007.

GODOY, H. *et al.* Diretrizes para a identificação expedita de solos lateríticos para uso em obras viárias. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador-BA, 1996.

GONÇALVES, R. F. Estudo da influência da variação do teor de umidade no valor do módulo de resiliência de um solo argiloso encontrado em subleito de rodovias no interior paulista. Tese de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

HOGENTOGLER, C. A. (1937). *Engineering properties of soil*. McGraw-Hill Book Company, Inc.

LARSON, R.; FARBER, B. – Estatística aplicada. 6ª Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

LELIS, T. A. – Influência da energia de compactação nas relações entre o módulo resiliente, CBR e resistência à compressão não confinada de solos da zona da mata norte de Minas Gerais. Tese de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Minas Gerais, Viçosa, 2004

PINTO, Carlos de Souza. - Curso básico de mecânica dos solos. Em 16 aulas. 3ª ed.. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

ROSSI, A. C. – Etapas de uma obra de pavimentação e dimensionamento de pavimento para uma via na ilha do fundão. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SANTOS, T. A. – Avaliação da resistência e da deformabilidade de quatro solos empregados em subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul. Tese de Mestrado - Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 2016

SEGEPI. Anuário estatístico do município de Belém: Aspectos do município de Belém. Secretaria Municipal de Planejamento, Prefeitura Municipal de Belém, 2020.

SOUZA JUNIOR, J. D. – O efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação do estado do Ceará. Tese de Mestrado – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

ZAGO, João Paulo – Estudo da deformação permanente de três solos típicos de subleitos rodoviários de Santa Maria-RS. Tese de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

ZICA, Elizeu da Silva – Estudo comparativo entre energias de compactação do subleito para subsidiar projetos de pavimentação. Tese de Mestrado, Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.