



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA  
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ALINE PEREIRA DA SILVA**

**INFLUÊNCIA DA TRAJETÓRIA DE UMEDECIMENTO  
OU SECAGEM NA RESPOSTA HIDROMECÂNICA DE  
SOLOS COMPACTADOS PARA CAMADAS DE  
PAVIMENTOS**

**Barreiras – BA**

**2022**

**ALINE PEREIRA DA SILVA**

**INFLUÊNCIA DA TRAJETÓRIA DE UMEDECIMENTO  
OU SECAGEM NA RESPOSTA HIDROMECÂNICA DE  
SOLOS COMPACTADOS PARA CAMADAS DE  
PAVIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dsc. Elier Pavón de la Fé.

**Barreiras – BA**

**2022**

## FICHA CATALOGRÁFICA

---

S586 Silva, Aline Pereira da.

Influência da trajetória de umedecimento ou secagem na resposta hidromecânica de solos compactados para camadas de pavimentos/ Aline Pereira da Silva. – 2022.

69f.

Orientador: Prof. Dr. Elier Pavón de la Fé.  
Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Barreiras, BA, 2022.

1. Compactação. 2. Comportamento hidromecânicos. 3. Trajetória de umedecimento.. I. Elier Pavón de la Fé. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia - Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD 624

---

**ALINE PEREIRA DA SILVA**

**INFLUÊNCIA DA TRAJETÓRIA DE UMEDECIMENTO  
OU SECAGEM NA RESPOSTA HIDROMECÂNICA DE  
SOLOS COMPACTADOS PARA CAMADAS DE  
PAVIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Aprovada em 07 de dezembro de 2022.

**Banca Examinadora**

Orientador: \_\_\_\_\_



Prof. Dr. Elier Pavón de la Fé.  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** FELIPE FERREIRA SOUSA JUNIOR  
Data: 22/12/2022 14:58:35-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Felipe Ferreira Sousa Junior  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** NELSON PADRON SANCHEZ  
Data: 22/12/2022 14:32:35-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Dr. Nelson Padrón Sánchez  
PROGEN PROJETOS GERENCIAMENTO E ENGENHARIA S.A

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por ter me permitido trilhar o caminho até a faculdade, e por me guiar para que concluísse o curso e chegasse até aqui.

À minha família pelo apoio. Em especial minha irmã, Andréia, pelas cobranças que sempre me fazia e que foram muito importantes para mim, pelas horas de sono perdidas ao meu lado revisando o texto, pela ajuda no laboratório nos momentos mais urgentes. Agradeço aos meus pais pelo carinho e pelo apoio incondicional, por estarem ao meu lado nos momentos mais difíceis me incentivando sempre.

À professora Oisy, pela excelente orientação e, em especial, pela amizade. Tê-la como guia nos projetos de pesquisa, aulas, escrita de artigos e no trabalho de conclusão de curso me moldaram como aluna e futura profissional.

Ao professor Elier, que sempre foi muito solícito, agradeço por assumir a missão da minha orientação e possibilitar que eu conseguisse defender o TCC.

Ao professor Vinícius, por estar sempre disponível para sanar minhas dúvidas sobre os ensaios e para me incluir nas orientações sobre o uso dos equipamentos do laboratório. Pelas excelentes colaborações para a melhora do resultado deste trabalho.

Aos professores Felipe e Nelson, pela análise atenta ao meu trabalho e pela orientação de como melhorá-lo. É um prazer tê-los na banca examinadora.

Aos professores da UFOB que participaram dessa trajetória, pelo ensino de qualidade e pela didática. Em especial, ao quadro discente de Engenharia Civil, pelos conselhos e orientações fundamentais ao ensino e ao mercado de trabalho.

Aos amigos da faculdade, pelo companheirismo e por fazerem dessa longa jornada algo tão especial. Em especial, cito Cássia, Priscila, Davi, Patielly e Alisson, que sempre estiveram ao meu lado me dando apoio e me motivando. Vocês foram fundamentais.

Aos amigos que me ajudaram nos ensaios em laboratório. Tiago, por me ajudar de forma fundamental na reta final dos ensaios, pela infinita paciência em me ouvir, motivar e me fazer companhia durante a apresentação. Rômulo, por me ajudar na árdua tarefa de coleta do solo. Iuan, companheiro de laboratório, por me socorrer sempre que eu não podia ir para a faculdade.

Agradeço à Universidade Federal do Oeste da Bahia - UFOB pela disponibilização do laboratório e equipamentos que possibilitaram que os ensaios dessa pesquisa foram realizados.

## **RESUMO**

A região Oeste da Bahia apresenta relevante expansão no agronegócio em âmbito local e como referência estadual, isso torna importante o estudo de fatores que possam interferir na qualidade e vida útil das estradas, pois o modal rodoviário é o principal meio de escoamento dos grãos. Diante do grande impacto da umidade na incidência de patologias nos pavimentos e da característica da região, com 83% das chuvas anuais concentradas entre 6 meses consecutivos, o trabalho objetiva verificar como a variação da trajetória de umedecimento do solo para a compactação interfere no seu comportamento hidromecânico. Para essa verificação foi utilizado um solo coletado em Barreiras – BA com uma metodologia que simule o preparo em períodos chuvosos e comparados com os dados obtidos simulando o período de estiagem. Foram constatadas alterações no comportamento hidromecânico do solo nos ensaios de compactação, expansão, CBR, adensamento e absorção de água por maio do papel filtro.

**Palavras-chave:** compactação, comportamento hidromecânicos, trajetória de umedecimento.

## **ABSTRACT**

The Western Region of Bahia presents relevant expansion in agribusiness, has a significant expansion in agribusinesses at the local level, but as a state reference, this makes it important to study factors that may interfere with the quality and useful life of roads, since the road modal is the main means of transport. of the grains. Given the great impact of humidity on the incidence of pathologies in the pavements, and the characteristic of the region, with 83% of annual rainfall concentrated between 6 consecutive months, the work aims to verify how the variation of humidity during compaction interferes with the hydromechanical behavior of the soil. For this verification, a soil collected in Barreiras - BA has been tested with a methodology that simulates soil preparation in rainy periods and compared with the data obtained simulating the dry period. Alterations were verified in the hydromechanical behavior of the soil in the tests of compaction, expansion, CBR, consolidation and water absorbed.

**Keyword:** compaction, hydromechanical behavior, trajetórias se molhagem.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Comportamento do solo compactado a uma mesma energia, apresentando de forma gráfica a relação da massa aparente seca x teor de umidade (SANTOS, 2014).....	20
Figura 2 - Esquema representativo das camadas de um pavimento flexível. (BERNUCCI, 2010) .....	23
Figura 3 - Esquema do ensaio de Adensamento Endométrico (Laboratório de Geotecnia - UFOB).....	25
Figura 4 - Fatores de impacto na sucção do solo, a) umidade e b) material. Fonte: respectivamente Croney et. al (1952) e Marshall, 1958.....	25
Figura 5 - tipos de fluxo de umidade entre o solo e o papel filtro. (Marinho, 1995). .....	26
Figura 6 - Curvas de calibração – adaptado de Chandeler e Gutierrez, 1986, por (Silva, 2017) 27	
Figura 7 - Foto tirada da jazida, localizada no bairro Renato Gonçalves em Barreiras – BA, no dia de coleta da amostra usada nesta pesquisa. ....	30
Figura 8 - Valores médios de precipitação e temperatura de Barreiras - BA com base nos dados dos últimos 30 anos. (Modificado de Climatempo, 2002) .....	31
Figura 9 - Programa experimental dessa pesquisa .....	32
Figura 10 - Solo seco a umidade destorroado .....	34
Figura 11 – Ensaio de massa específica real dos grãos.....	34
Figura 12 - a) ensaio de limite de plasticidade, b) ensaio de liquidez pelo método de Casa Grande e c) Amostras dos ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade secando na estufa a 110°.....	35
Figura 13 - Ensaio de Granulometria a) peneiramento grosso, b) peneiramento fino, c) preparação de amostra com e sem defloculante e d) ensaio de sedimentação com e sem defloculante após 24h.....	35
Figura 14: compactador mecânico .....	36
Figura 15 - Preparação do solo para compactação pelo processo de molhagem.....	37
Figura 16 - Preparação do solo para compactação pelo método de Secagem. a) solo úmido e b) amostra secando ao ar. ....	38
Figura 17 - Amostras de solo compactadas com energia Proctor Normal. À esquerda, mais homogêneo, está a amostra preparada por molhagem, e à direita, com perceptíveis vazios, amostra preparada por método de secagem.....	38
Figura 18 a) ensaio de expansão do solo b) ensaio de Índice de Suporte Califórnia - CBR.....	39
Figura 19 - ensaio de adensamento do solo realizado em duas amostras preparadas por metodologias distintas .....	40
Figura 20 – Cilindros de moldagem para ensaio de absorção de água pelo método do papel filtro.....	41
Figura 21 - Limite de Liquidez. ....	42
Figura 22 - Curva granulométrica com e sem uso de defloculante .....	43
Figura 27 - Curvas de Pressão x Penetração para Molhagem energia Proctor Normal.....	48
Figura 28- Curvas de Pressão x Penetração para Secagem energia Proctor Normal .....	49
Figura 29 - Curvas de Pressão x Penetração para Molhagem energia Proctor Modificada .....	50
Figura 30 - Curvas de Pressão x Penetração para secagem energia Proctor Modificada .....	50
Figura 31 - Adensamento - Molhagem .....	52
Figura 32 - Adensamento - Secagem .....	53
Figura 33 - Altura x Raiz do tempo - Carregamento - Molhagem .....	54
Figura 34 - Altura x Raiz do tempo - Carga de contato e Descarregamento - Molhagem.....	55
Figura 35 - Altura x Raiz do tempo - Carregamento - Secagem.....	55
Figura 36 - Altura x Raiz do tempo - Carga de contato e Descarregamento - Secagem.....	56

Figura 37 - Umidade gravimétrica x Sucção.....	58
Figura 40 - Adensamento pelos métodos de molhagem e secagem .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo de equilíbrio para medição da sucção total. Fonte: Marinho, 1997. ....	28
Tabela 2 - Índices físicos.....	42
Tabela 3 - Distribuição granulométrica com e seu uso de defloculante.....	43
Tabela 4 - Compactação - energia Proctor Normal - método de molhagem .....	45
Tabela 5 - Compactação - energia Proctor Normal - método de secagem .....	46
Tabela 6 - Tabela resumo do ensaio de compactação para energia Proctor Normal.....	46
Tabela 7 - Compactação - energia Proctor Modificada - método de molhagem.....	47
Tabela 8 - Compactação - energia Proctor Modificada - método de secagem.....	47
Tabela 9 - Tabela resumo do ensaio de compactação para energia Proctor Modificada.....	47
Tabela 10 - Valores de CBR para energia Proctor Normal .....	49
Tabela 11 - Expansão x Umidade - energia Proctor Normal .....	51
Tabela 12 - Expansão x Umidade - energia Proctor Modificada .....	51
Tabela 13 - Tabela resumo do ensaio de adensamento - energia Proctor Normal .....	53
Tabela 14 - Tabela de deformação específica vertical - energia Proctor Normal .....	56
Tabela 15 - Coeficiente de adensamento - energia Proctor Normal.....	57

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
1.1. Justificativa .....	13
1.2. Hipótese.....	14
1.3. Objetivos .....	14
1.3.1. Objetivo Geral .....	14
1.3.2. Objetivos Específicos.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:.....	16
2.1. Estudos sobre a importância da umidade para a compactação do solo .....	16
2.2. Solos intemperizados.....	17
2.3. Compactação em períodos chuvosos.....	18
2.4. Influência da forma de preparo do solo para sua resistência e estabilidade.....	19
2.5. Utilização do solo em engenharia .....	21
2.5.1. Identificação visual: .....	21
2.5.2. Solo como elemento construtivo .....	22
2.5.2.1. Solos para pavimento .....	22
2.6. Comportamento mecânico.....	24
2.7. Comportamento hidráulico.....	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	29
3.1. Metodologia .....	29
3.2. Local de coleta de amostras .....	29
3.3. Clima e precipitações .....	30
3.4. Programa experimental .....	31
3.1. Ensaio laboratoriais .....	33
3.1.1. Caracterização Geotécnica Convencional.....	33
3.1.2. Comportamento Mecânico .....	35
3.1.3. Comportamento hidráulico.....	40
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	42
4.1. Ensaio de Caracterização Geotécnica.....	42
4.2. Granulometria com e sem Defloculante.....	43
4.3. Ensaio de Compactação, Expansão e CBR.....	44
4.4. Adensamento unidimensional .....	52
4.5. Curva de retenção de água .....	57
4.6. Análise dos Resultados.....	59

4.6.1.	Caracterização .....	59
4.6.2.	Compactação .....	59
4.6.1.	Índice de Suporte Califórnia - CBR .....	60
4.6.2.	Expansão .....	61
4.6.3.	Adensamento edométrico .....	61
4.6.1.	Curva de retenção de água .....	63
5.	Considerações finais.....	64
5.1.	Conclusões .....	64
5.2.	Sugestões para pesquisas futuras.....	65
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	66

## **1. INTRODUÇÃO**

As construções de obras em engenharia civil estão intrinsicamente ligadas à questão da análise do solo, pois este serve como elemento construtivo ou de apoio, em que se citam, por exemplo, as estradas, prédios, aterros e taludes. Em Barreiras, localizada no Oeste da Bahia, local da pesquisa, o crescimento do agronegócio já vem sendo incentivado desde 1960 pelas três instâncias do Estado (SOUZA; SANTOS; BRANDÃO, 2015). Isso mostra a relevância de análises voltadas para os pavimentos, visto que o modal rodoviário é o principal meio para escoamento da produção.

Para garantir a qualidade das camadas do pavimento são feitas previamente análises em laboratório do material coletado determinando as condições de compactação para alcançar o melhor desempenho e que atenda aos requisitos mínimos. Essas análises seguem as normas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT e pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT que determinam métodos que padronizam os ensaios, reduzem o tempo de execução e simulam as condições encontradas em campo.

Pinto (2016) , recomenda que quando a umidade natural do solo for superior a umidade estipulada faça-se a correção da mesma pelo método de aeração, em que se proporciona a secagem do material ao ar. Isso porque é mais viável, econômica e logisticamente, que se trabalhe com a matéria prima presente no local. Nesse sentido, a execução do ensaio de compactação em conformidade com a ABNT NBR 7182 (2016) não representa com veracidade o método de preparo aplicado em campo.

Nessa perspectiva, esse trabalho busca compreender possíveis alterações no comportamento do solo compactado preparado quando se encontra saturado ou com alto grau de umidade e passa por um processo de secagem para atingir a umidade ótima determinada em laboratório. Objetiva-se, assim, entender de se a resposta do comportamento hidromecânico difere da amostra preparada a partir da molhagem do solo seco a umidade hidrocópica.

### **1.1. Justificativa**

O crescimento da região Oeste da Bahia ocasionado pela expansão das fronteiras agrícolas traz como consequência o tráfego de veículos pesados. Esse por sua vez, gera mais desgastes no pavimento, motivo pelo qual se faz necessário o

estudo da vida útil das estradas da região. Diante disso, são pontos relevantes a determinação da resistência às variações climáticas, a carga suportada e a estabilidade.

Além da ação inferida pelas cargas dos veículos, o pavimento sofre com um agravante relacionado as características climáticas da região. Este apresenta uma concentração de 83% das chuvas anuais entre outubro e abril e consequente longo período de seca e baixa umidade nos demais meses (PINTO; SILVA; OLIVEIRA, 2006). A variabilidade das condições climáticas produz modificações no teor de umidade do solo, que ocasionam alterações no comportamento hidromecânico e estrutural dele, agravando as manifestações patológicas que afetam a qualidade da superfície do pavimento e, portanto, o conforto e segurança do usuário ao trafegar.

## **1.2. Hipótese**

A pesquisa trabalha com a hipótese de que o solo, em campo, que se encontre com alta umidade e com elevado grau de saturação - o que seria esperado em períodos chuvosos – após um processo de secagem apresente um comportamento hidromecânico diferenciado quando comparado com aquele preparado em laboratório utilizando as normas vigentes. Tendo em vista que em laboratório ele passa por um controle rigoroso de homogeneidade, secagem a umidade hidrocópica e posterior molhagem controlada para atingir a umidade ótima.

Sendo assim, pretende-se comparar o comportamento hidromecânico nessas duas condições. A intenção é medir o quanto a variação na forma de preparo das amostras para compactação afeta esse comportamento e a estrutura do solo utilizado nas camadas de pavimento. O trabalho também se propõe a investigar a composição da estrutura mineralógica de forma a entender os dados coletados dos ensaios anteriores.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo Geral**

Avaliar como as trajetórias de umedecimento e de secagem no preparo do solo interferem no comportamento hidromecânico do material compactado. Para isso, foi coletado amostras de solo em uma jazida na região do Oeste da Bahia com potencial para uso como camada de pavimento

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar fisicamente o solo;
- Avaliar o comportamento mecânico do solo através da realização de curvas de compactação com diferentes energias para o ensaio de CBR;
- Definir como a forma de preparação das amostras, que simulam as condições de exposição, afeta a compactação - expansão pelo tanque de imersão - resistência e a compressibilidade do solo;
- Avaliar o comportamento hidráulico do solo a partir de curvas de retenção da água em estado compactado;

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:**

### **2.1. Estudos sobre a importância da umidade para a compactação do solo**

Meios de se garantir uma melhor qualidade do material compactado é um tema recorrente em pesquisas na área de mecânica dos solos. Dessa forma, há pesquisas que analisam o grau de impacto de diversos fatores de manipulação do solo no resultado. Essas questões estão presentes nos trabalhos dos autores apresentados a seguir que abordam a implantação prática de métodos que possibilitam maior vida útil de pavimentos e estabilidade de fundações.

Pinto (2006) ressalta a importância da qualidade da compactação e traz o conceito de que mais relevante do que a resistência final é a estabilidade do material e sua resistência às variações climáticas. É essa qualidade que estipulará a confiabilidade do subleito em que se apoiará a construção. Com o objetivo de verificar o impacto da compactação no comportamento do solo muitos estudos relacionados podem ser encontrados na literatura.

Dessa forma, variadas abordagens podem ser encontradas sobre a descoberta dos fatores que interferem na qualidade no material compactado e da medição do grau de dessa interferência. Há autores (Bertolazi, 2013; Borges, 2014; Werk, 2000) que se voltaram para o material trabalhado e se dedicaram à análise da matéria prima, do método de trabalho e o impacto da forma de manipulação no resultado. Há também aqueles que tiraram o foco do objeto, solo, e se debruçam sobre os a validade dos métodos de análise e da aplicabilidade em campo do visto em laboratório, como o caso de Stefanoski et al., (2013) e de Antunes (2017).

Werk (2000) está no primeiro grupo, e analisou como o comportamento resiliente e a sucção do solo são afetados por diferentes métodos de compactação. A pesquisa destaca que, tanto em solos arenosos quanto para argilosos, mesmo uma pequena variação da umidade causa uma significativa mudança na sucção observada.

Nessa mesma abordagem, Borges (2014) relacionou a análise estrutural de amostras com diferentes graus de compactação e umidade com o seu desempenho em ensaios hidromecânicos. Dessa forma, foram simuladas condições adversar que iam desde o solo natural compactado a lama, para compreender o impacto da estrutura inicial do solo nos índices e no comportamento mecânico.

Não apenas Werk (2000) e Borges (2014) se focaram no comportamento do solo de acordo com a forma com que são trabalhados. (Díaz-Coral; Valencia-González; Carvalho, 2021) observaram queda na resistência do solo à ruptura por aumento de pressão nos poros.

Partindo da abordagem sobre a aplicação dos dados de laboratório na prática, buscando assim complementar e aprimorar os conhecimentos sobre como obter maior qualidade da compactação em campo, há trabalhos como o de (STEFANOSKI et al., 2013). Eles concluíram que os dados para a qualidade física do solo são obtidos em condições muito específicas e que maiores ensaios e estudos são necessários para validação desses resultados quando comparado com o obtido em campo.

Retomando a Werk (2000), ele também trabalhou em sua pesquisa mais de um método de medição de sucção para validar a confiabilidade de um método com o outro. Uma vez constatado a confiabilidade, mais evidentes seus dados ficaram sobre como uma pequena variação nas condições de preparo do solo acarreta diferentes características do material final.

Antunes (2017) aborda na sua pesquisa casos de patologias no pavimento que são agravadas nos períodos chuvosos ou por falhas na compactação. Neste último, constatou-se serem devido a possíveis falta de controle, uso de maquinário não adequado ou então outros fatores de desgastes como por excesso de cargas.

Este estudo dá prosseguimento aos estudos de Silva (2021), que fez uma análise comparativo da viabilidade para pavimento de alguns solos da região Oeste da Bahia, sendo um dos materiais analisados coletado na mesma jazida desse estudo. Da mesma forma, o estudo citado faz parte de uma linha de pesquisa de solos utilizados para pavimento que se iniciou com Paiva (2019).

## **2.2. Solos intemperizados**

Solos são o resultado das intempéries sobre os minerais das rochas que produzem materiais finos e porosos, seja por resultado de ações físicas como a fragmentação por trincas de dilatação devido a aumento de temperatura ou em razão de ações químicas que modificam por meio de reações com os minerais dissolvidos em água e que se cristalizam formando estruturas distintas dos originais (QUEIROZ, 2016).

Primavesi (2017) afirma em seu livro sobre o manejo ecológico do solo para agricultura em regiões tropicais que o principal agente intempérico para o desenvolvimento dos diferentes perfis pedogênicos é a água, sendo ela responsável pelos processos de laterização, salinização e podzolização.

Popp (2017) explica que no processo de laterização em regiões tropicais e subtropicais são marcadas por uma estação seca bem definida que pode ocorrer a movimentação de nitrato de potássio para a superfície. O período de chuvas promove o lixiviamento da sílica e outros elementos básicos que percolam a estrutura. A evolução desse processo com o passar do tempo resulta em um solo com acumulação de ferro e alumínio próximos à superfície.

Segundo Almeida et al. (2017) com dados coletados no período de 1975 a 2015, junho é o mês de menor precipitação, 1mm, enquanto os meses de novembro a janeiro tem os maiores valores, já a quadra chuvosa que se estende de outubro a abril tem média de 169,7mm/mês. Por fim, a média anual calculada foi de 1008,9mm/ano.

Dos dados de precipitação é possível verificar as duas estações chuvosas, uma de seca e outra com chuvas concentradas, além de que a média de precipitação anual é superior a 635mm. Segundo Popp (2017), solos formados em zonas tropicais e subtropicais em que a média anual supera 635mm são consideradas condições úmidas e são chamadas de pedalfers, ou seja, solos com presença de alumínio e ferro. Constituem solos empobrecidos e com baixa quantia de potássio, cálcio e fósforo, sendo assim, deficientes nos principais nutrientes orgânicos e minerais considerados na avaliação para plantio.

### **2.3. Compactação em períodos chuvosos**

Durante os períodos chuvosos a umidade do solo aumenta pela percolação da água, em alguns casos chegando a umidades superiores a desejada para executar os trabalhos. Além do uso de maquinário específico para solos úmidos, há também meios para se alcançar a umidade estipulada em projeto. A priori ocorre a correção da umidade, em que a escolha do método adotado se deve à disponibilidade de recursos e pelo menor custo de operação.

Em estudos mais recentes é possível encontrar tentativas para atender a essa finalidade, como o de (Melo, 2020) que trata do uso de pó de pedra granítica e cal viva

para a correção da umidade do solo em obras de terraplanagem. Embora seja observado uma redução do Índice de Plasticidade, aumento do CBR, diminuição da expansão e pouca alteração granulométrica esse método apresenta limitações para adoção na prática. O não conhecimento da proporção correta de acréscimo desses materiais, método suficiente apenas para correção de umidade quando ocorrem chuvas ocasionais, o acesso e disponibilidade de matéria prima são os principais fatores que poderiam inviabilizar esse método.

Outra alternativa para a correção da umidade é a secagem do material já presente no campo e previsto inicialmente para a obra. Fiori (2015), ao apresentar os cálculos dos índices físicos do solo, define a aeração como a porcentagem entre o volume de ar e o volume de vazios. O processo de aeração é comum para várias ciências que trabalham com o solo, pois ele pode trazer diversas aplicabilidades, mas para a engenharia civil ela consiste em usar maquinário como arados, motoniveladora e escarificador para movimentar o material e expô-lo ao sol e ao vento a fim de favorecer a secagem natural.

Esse é o método mais adotado nas obras, por ser o mais acessível e mais barato. Pinto (2016) apresenta apenas esse método seguido de revolvimento mecânico para homogeneização como orientação para corrigir de umidade em campo quando a umidade natural é superior a umidade ótima.

#### **2.4. Influência da forma de preparo do solo para sua resistência e estabilidade**

Preparar o solo para uso em obras de engenharia civil exige a priori um estudo em laboratório das amostras disponíveis para determinar qual usar e como trabalhá-la. Primeiramente, para constatar se é adequado à finalidade desejada o material deve ser caracterizado e depois ensaiado nos quesitos de importância no que tange a cada tipo de obra. Outro ponto de grande relevância é a determinação da umidade ótima de compactação, pois ela permitirá obter o melhor desempenho do solo compactado, situação em que terá maior densidade e interação entre as partículas que lhe conferirá resistência e estabilidade.

Aumentar mecanicamente a densidade do solo é o que se denomina de compactação (SANTOS, 2014). Isso ocorre quando se aplica energia ao solo, fazendo com que os torrões de argila sejam amolgados, as partículas granulares se aproximem e o ar seja expulso. A compactação é promovida em obras de terra para que dessa forma o

solo atinja sua maior resistência possível, diminua a instabilidade e minimize os recalques (BARNES; TIBANA, 2016).

Uma vez entendido o conceito de compactação, é preciso compreender como a umidade interfere nesse resultado. Conforme citado pelos autores Batista (1976), Santos (2014) e Werk (2000) foi em 1933 que o engenheiro Ralph Proctor descobriu o que viria a se tornar um dos mais importantes princípios da mecânica do solo, de que, com um mesmo solo e a uma mesma energia aplicada, a massa específica obtida pela compactação depende da umidade no momento da compactação. A Figura 1 apresenta a característica da curva de compactação.

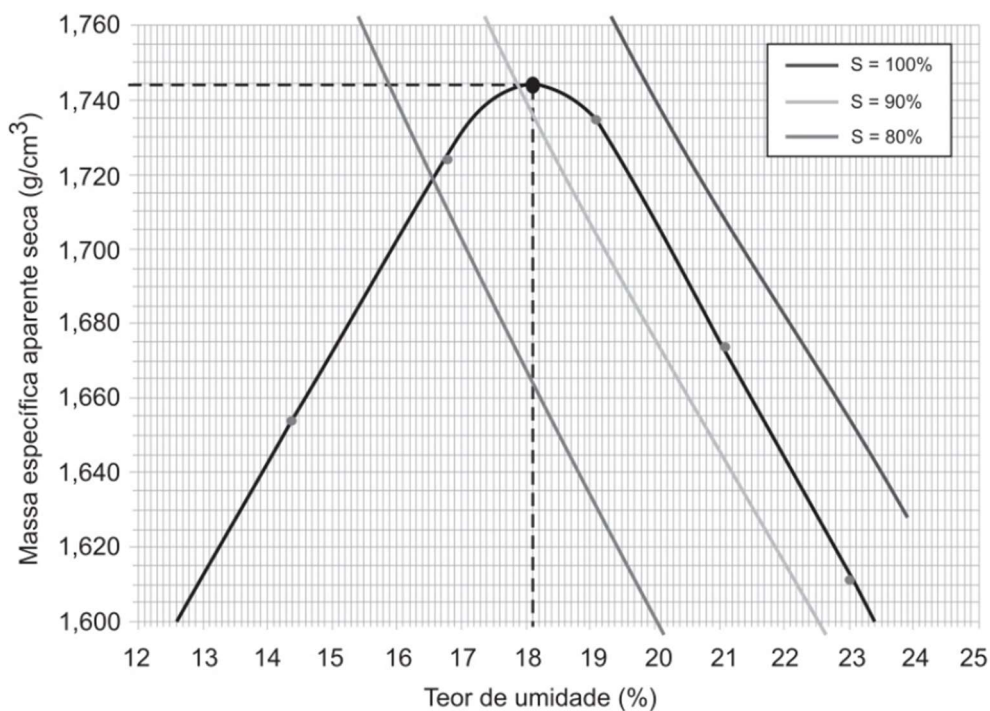


Figura 1- Comportamento do solo compactado a uma mesma energia, apresentando de forma gráfica a relação da massa aparente seca x teor de umidade (SANTOS, 2014)

Segundo Santos (2014), compactar os solos proporciona maior interação e entrosamento entre as partículas, isso aumenta o atrito interno que interfere diretamente para que a resistência ao cisalhamento deste seja maior. Dessa forma, a compactação proporciona acréscimo na capacidade de suporte de cargas, pois diminui os vazios, isso, consequentemente, reduz a absorção de água e a percolação e, por fim, torna o solo mais estável.

A explicação presente no livro de (Barnes; Tibana, 2016), permite compreender o porquê do comportamento observado no gráfico. Ele explica que a aplicação de

determinada energia em solo com baixa umidade resulta em vazios, pois há maior atrito entre as partículas e a compactação não é suficiente para expulsar todo o ar. Em que a estrutura apresenta um aspecto de compressão geral, porém, quando submetida a esforços de camadas superiores ou da estrutura que serve de apoio pode colapsar. Em contrapartida, quando se tem mais umidade o atrito é reduzido e a energia aplicada consegue expulsar o ar dos poros, deixando a estrutura com a densidade seca máxima, o que resulta na determinação da umidade ótima de compactação. Por fim, se aumentar-se ainda mais a umidade acontece que a própria água preencherá os vazios, os grãos não conseguirão se aproximar, impedindo a diminuição do volume e diminuirá a coesão das partículas

Matuella (2013) estudou o impacto da variação na umidade para o solo compactado. Ao analisar um solo siltoso ele concluiu que o aumento do teor de água na amostra causa redução na tensão de cisalhamento quando este é preparado acima da umidade ótima, porém as influências do umedecimento quando o solo é compactado dentro dos valores de 2% de tolerância, segundo orienta o DNIT 137 (2010), são poucas. Porém o maior impacto é observado quando compactado em valores inferiores à ótima.

Assim, conclui-se que o controle da umidade em campo deve ser rigoroso, pois ele está intrinsicamente ligado a qualidade do material. A atenção criteriosa dada a essa etapa será relevante para posterior observância de patologias e na segurança da estrutura. Uma vez feito o controle do material e da umidade, resta a aplicação correta de energia para determinar a resistência alcançada.

## **2.5. Utilização do solo em engenharia**

### **2.5.1. Identificação visual:**

Ao primeiro contato com o solo algumas características são fáceis e rápidas de se constatar e que podem fornecer informações relevantes sobre o material. Portanto, o conhecimento desses itens e a experiência do profissional que fará a análise determinarão a confiabilidade dos dados preliminares. Entre essas características, chamam a atenção a coloração, o aspecto tátil e o perfil do horizonte de extração.

A cor do material é facilmente observada em amostras. Segundo Klein e Dutrow (2012), essa propriedade pode ser característica de diagnóstico em casos em que o elemento químico causador é essencial ao mineral. Como elementos minerais citados

pelos autores que apresentam composição fundamentais para a coloração temos o enxofre que fornece uma coloração amarelada, a turquesa com cor azul-esverdeado a verde azulado, malaquita com a cor verde, entre outros.

Quanto a textura, em solos arenosos, segundo o Sistema de Classificação Unificado – SUCS, desenvolvida pelo engenheiro Arthur Casagrande, apresentam comportamento não coesivo e não plástico. Dessa forma, solos e pedregulhos apresentam menor coesão quando moldados, o que faz com que solte grãos, comportamento também observado quando são escavados, (SANTOS, 2014).

### **2.5.2. Solo como elemento construtivo**

Além da função de suporte para uma obra construída acima, há amplos casos em que o solo faz parte do elemento construtivo, como em pavimento para estradas e aeroportos, barragens, aterro e taludes. Nesses casos, o solo deve atender a certos requisitos de comportamento para cada estrutura. Caputo *et. al.* (2015) ressalta que a importância do material atender aos requisitos de granulometria, compactidade e umidade.

Ainda segundo Caputo *et. al.* (2015), caso não atenda aos requisitos o material deve então ser melhorado com tratamentos adequados para possibilitar sua utilização. O primeiro parâmetro, granulometria, se preocupa com o equilíbrio entre partículas grossas – que confere resistência e é a fração inerte da estrutura - com as partículas finas que são aglutinantes e contribuem com a coesão dos grãos. A compactidade objetiva melhor resultado do processo de compactação que melhora a resistência e permeabilidade do material. Por fim, a umidade atua nas partículas finas proporcionando a coesão do terreno.

Dessa forma, conclui-se que o objetivo de controle desses parâmetros nada mais é do que garantir maior atrito interno das partículas e a coesão, ou seja, a resistência do solo. A seguir, estão retratados quais as particularidades necessárias para diversos uso do solo como elemento construtivo.

#### **2.5.2.1. Solos para pavimento**

Dresch (2018) define que a estrada se compõe por uma estrutura de camadas sobre a fundação, chamada de subleito. Em seu livro, ela comenta que as camadas base, sub-base e reforço do subleito, sendo feitas de solo, passam por métodos de seleção e caracterização para determinar a espessura, a rigidez e como essas diferentes camadas com diferentes propriedades interagirão entre si.

Para avaliação da terminação das camadas do pavimento e suas particularidades, Marinho; Costa; Almeida (2020) apresentam como estrutura típica uma composição de concreto asfáltico – CA para revestimento, brita graduada simples – BGS como base e macadame seco – MS como camada de sub-base, e solo local para subleito do pavimento. Todas essas camadas possuem requisitos de resistência do material granular, granulometria e distribuição granulométrica mínimas estipuladas para manter uma qualidade padrão às camadas. Estas devem, então, atender aos quesitos de resistência, deformabilidade e permeabilidade, tanto antes, quanto após a compactação.

Os padrões das camadas são definidas pelo DNIT pelas normas DNIT 137 (2010) para subleito, DNIT 138 (2010) para reforço do subleito, DNIT 139 (2010) para sub-base, DNIT 141 (2010) para base e DNIT 031 (2006) para concreto asfáltico. De forma sintetizada os requisitos são de:  $CBR \geq 2\%$  e  $\text{expansão} \leq 2\%$  para o subleito; CBR maior que o subleito e  $\text{expansão} \leq 1\%$  para reforço do subleito;  $CBR \geq 20\%$  e  $\text{expansão} \leq 1\%$  para a sub-base; e  $CBR \geq 80\%$  e  $\text{expansão} \leq 0,5\%$  para a base.

Na Figura 2 mostra a esquematização das camadas do pavimento. Bernucci et. al. (2010) expõe como as camadas superiores usam materiais de maior resistência de forma a receberem diretamente as cargas e as transmitir para as camadas inferiores, em razão de serem mais espessas e de fato absorvem as cargas e as distribuem de forma mais homogênea no substrato natural, subleito. Dentre essas camadas, a base é a responsável pela maior absorção das cargas, possui o controle mais rigoroso sobre a qualidade do comportamento hidromecânico e pode apresentar uma espessura considerável quando comparada às demais camadas.

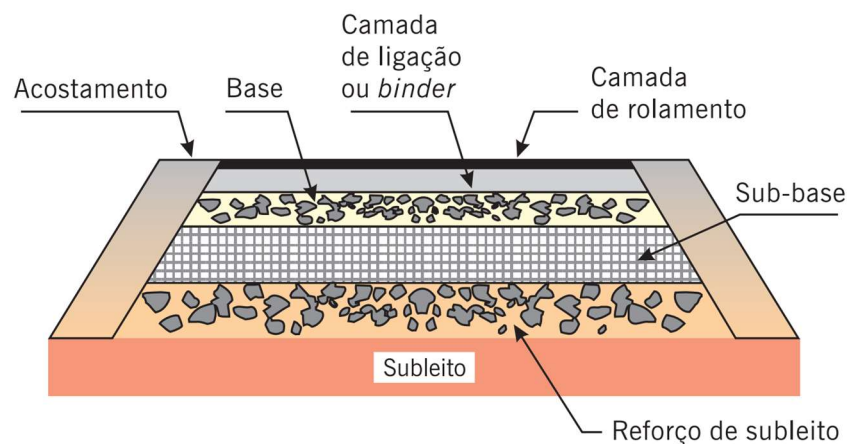


Figura 2 - Esquema representativo das camadas de um pavimento flexível. (BERNUCCI, 2010)

Tendo atendido aos critérios de escolha de material, Antunes (2017) apresenta dois tipos de patologias decorrentes da falta de compactação em pavimentos para estradas. A primeira ele relaciona com as deformações do terreno, sendo essas de impacto direto na estrada construída e interferindo até na segurança dos usuários. Em contrapartida, o segundo tipo, nomeado de densificação, é decorrente das cargas do tráfego que ocasionam redução do volume, essa pode ser controlada através de uma correta compactação durante o processo de construção do pavimento.

A compactação inadequada do solo que compõe o pavimento interfere no desempenho por estar diretamente relacionada com na resistência as tensões aplicadas. Alguns impactos diretos da compactação estão: na compressibilidade do solo, sujeito a afundamento devidos ao grande índice de vazios, configurando um processo irreversível; alguns tipos de solos quando compactados muito secos podem ter estrutura colapsáveis ao ter contato com água; também ocorrem patologias por cisalhamento que são conhecidas pelo efeito de trilhas de roda, nada mais são do que o afundamento do revestimento nos pontos com maior incidência do peso das rodas dos veículos.

## **2.6. Comportamento mecânico**

Para compreender as características de resistência do solo compactado, são feitos ensaios que simulam as condições de carregamento e saturação da amostra após a compactação. O ensaio de adensamento unidimensional foi escolhido por possibilitar conhecer os parâmetros de compressibilidade a tensões verticais sobre o solo compactado. Assim, é observado como ele se comporta sobre carregamentos a profundidade, tal qual o solo usado para camada de pavimento.

O Ensaio Edométrico, também chamado de Ensaio de Adensamento Edométrico ou simplesmente Adensamento, é regulamentado no Brasil segundo o que determina o DNIT, pela ABNT e pela American Society for Testing and Materials - ASTM, sendo as normas correspondentes a DNER - IE 005 (1994), e também a ASTM D2435/D2435M - 11 (2020).

A representação do ensaio está esquematizada na Figura 3. Nela aparece a célula de carga com o solo e encaixado no aparelho devidamente nivelado para aplicação vertical da carga.



Figura 3 - Esquema do ensaio de Adensamento Endométrico (Laboratório de Geotecnia - UFOB)

## 2.7. Comportamento hidráulico

Stein et al. (2021) define que a sucção em solos está relacionada com a pressão de água nos interstícios do solo, sendo ele relacionado com perda ou absorção de água a depender de diversas condições como temperatura, tipo de solo, geologia etc. A Figura 4 apresenta o formato característico dessa curva e fatores que influenciam nela. O autor ainda destaca as principais técnicas para essa medição, sendo eles: psicrômetro, papel filtro, tensiômetro, translação de eixo, condutividade térmica e condutividade elétrica.

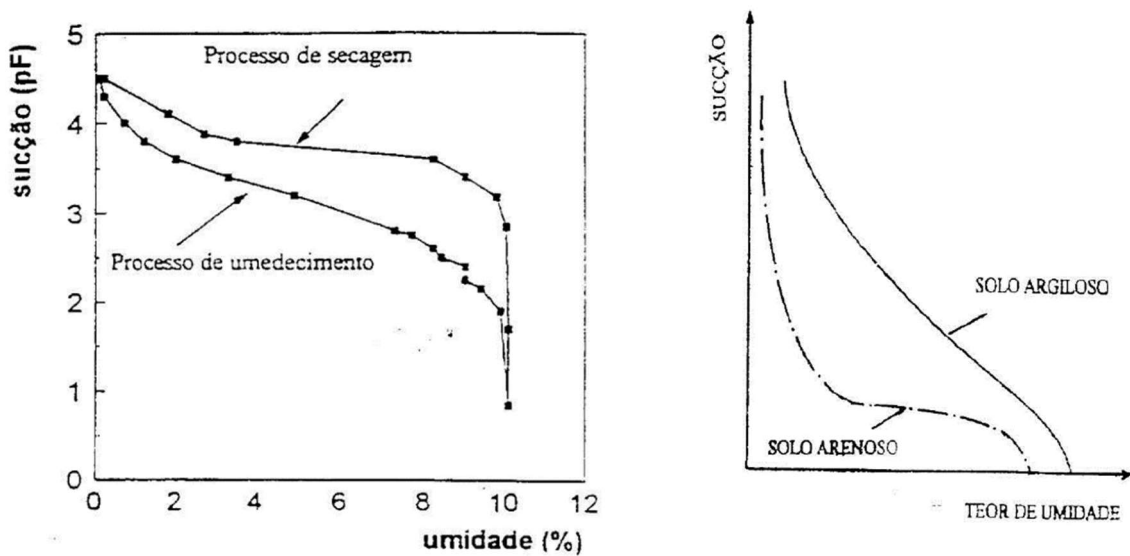


Figura 4 - Fatores de impacto na sucção do solo, a) umidade e b) material. Fonte: respectivamente Cronney et. al (1952) e Marshall, 1958.

Em sua pesquisa sobre o comportamento hidromecânico relacionado as características mineralógicas do solo, Borges (2014) menciona a utilização do papel filtro para potencializar a obtenção da curva de retenção de água do substrato. Isso porque este método permite observar grandes faixas de sucção de água e, assim, obter a leituras de valores altos de absorção, segundo a ASTM D5298 - 16 (1992) esse método permite avaliar a sucção desde 10KPa até valores de 100.000KPa.

Borges (2014) explica que a sucção ocorre por meio do contato do material granular com o papel filtro em umidade menor. Neste caso, ocorre que estando o solo mais úmido e sendo ele um material poroso funciona como fonte de vapor para o papel que absorverá a parte dessa umidade. A estabilização desse processo será alcançada quando a energia livre da água seja alcançada, ou seja, a energia de sucção entre os materiais e a pressão de vapor se igualam, (Fredlund e Rahardjo, 1993).

A Figura 5 mostra o esquema de como se dá o fluxo de umidade entre o solo compactado e o papel filtro segundo determinado por estudos de Marinho (1995). Assim, ele explica que ocorre é o equilíbrio hidráulico que se dá em materiais com umidade diferente, e é através da umidade do papel filtro que se obtêm a sucção por meio da curva de calibração do mesmo.

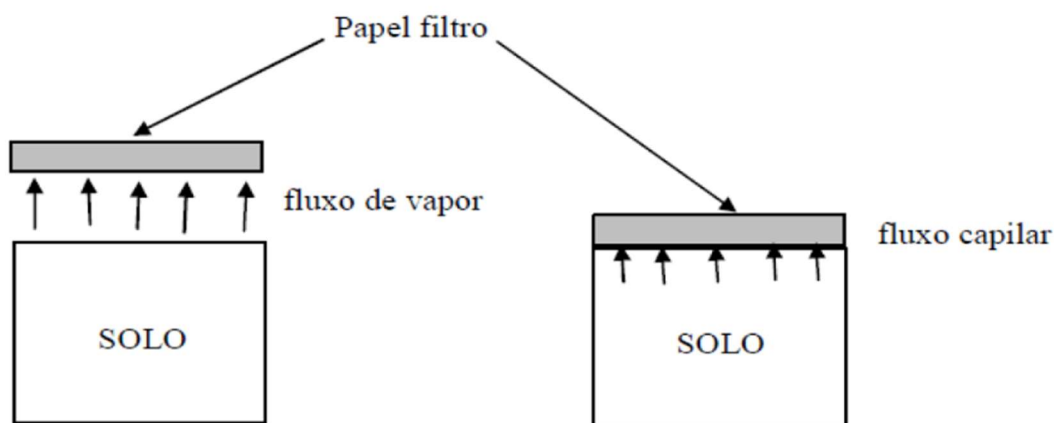


Figura 5 - tipos de fluxo de umidade entre o solo e o papel filtro. (Marinho, 1995).

O sistema do ensaio é composto por amostra preparada segundo as condições de umidade e compactação desejadas, então é posto em contato com uma camada de papel filtro para proteção em contato com o solo, papel filtro de menor diâmetro para a medição e uma terceira camada de papel filtro de proteção. Ainda segundo Marinho (1995), todo

esse sistema é isolado com com camadas, respectivamente, de papel filme, papel alumínio e papel filme. Isso para que se constitua um sistema hermeticamente fechado e assim não haja trocas de umidade com o ambiente externo.

Para a determinação da sucção é feito o ensaio com o uso de algum papel filtro já conhecido para se comparar os dados obtidos no ensaio com base na curva de calibração do mesmo. Abaixo, a Figura 6 mostra um exemplo de como é uma curva de calibração apresentando a utilizada por Silva (2017) em seu estudo sobre empuxo em solos residuais.

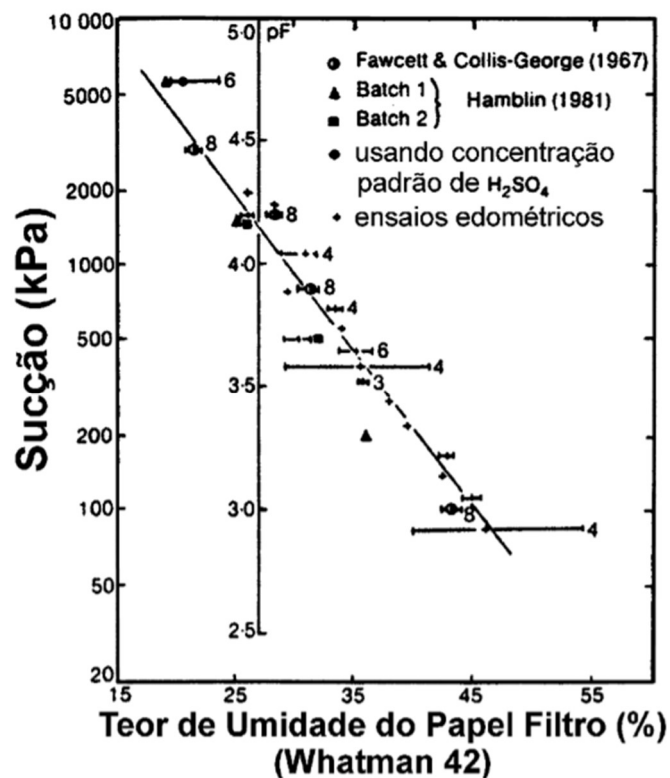


Figura 6 - Curvas de calibração – adaptado de Chander e Gutierrez, 1986, por (Silva, 2017)

Chrystello (2017) fala sobre a curva ser uma propriedade específica de cada tipo de papel e, portanto, ser um dado já predeterminado com base na gramatura e marca escolhida. Ela também aponta que as especificações mais usadas são os papéis Whatman N° 42 (W42) e Schleicher e Schuell N° 589 (SS59), sendo o primeiro mais espesso e de poros de menor dimensão do que o segundo. Vários são os tipos de papéis disponíveis no mercado, sendo importante conhecer a calibração do escolhido, há diversos estudos de calibração e análise da qualidade do resultado obtido para a sucção no ensaio depende da qualidade da curva de calibração adotada.

Para os ensaios realizados para este estudo foi utilizado o papel Quanty JP42, faixa azul. Trata-se de um papel de procedência alemã, de 80g/m<sup>2</sup>, permeabilidade ao ar 3L/sm<sup>2</sup> e maioria dos poros de 8µm. Borges *et. al.* (2010) fez estudos com o mesmo papel filtro utilizando o mesmo papel, Quanty e usa a seguinte equação para calibrar a curva de sucção do solo.

$$Sucção (KPa) = e^{[(161,44-w)/24,07]}, para W > 55\% \quad \text{Equação (1.1)}$$

$$Sucção (KPa) = e^{[(79,782-w)/6,26]}, para W \leq 55\% \quad \text{Equação (1.2)}$$

Em que, w é a umidade do papel filtro e e é a constante matemática, número de Euler. Para o desenvolvimento desta pesquisa, outro ponto importante é definir o tempo de duração do ensaio, pois este é um fator que influencia diretamente nas sucções obtidas, segundo a Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Tempo de equilíbrio para medição da sucção total. Fonte: Marinho, 1997.

Nível de Sucção Total (KPa)	Tempo de equilíbrio sugerido
0 - 100	> 30 dias
100 - 250	30 dias
250 - 1.000	15 dias
1.000 - 30.000	7 dias

Foi escolhido utilizar o período de 14 dias. Tempo suficiente para a estabilização do sistema e obtenção dos resultados do ensaio, um tempo não tão extenso devido a conservação do papel. Devido a ser um material que deve ser trabalhado com muito cuidado o risco de influência externa ou mesmo de mofo reduz do que se comparado a um ensaio de 30 dias.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Este capítulo apresenta o método de pesquisa adotado, a descrição da amostra coletada para estudo e o esquema do projeto dos ensaios em laboratório. Com essas informações é possível compreender o passo a passo escolhido para responder a problemática da pesquisa e responder a hipótese proposta.

#### **3.1. Metodologia**

Uma vez definido o tema do projeto e o foco da pesquisa, foi criada uma hipótese que explicasse a problemática. Para testar a validade dessa hipótese, a metodologia apresentada a seguir foi desenvolvida. De forma direta, a pesquisa se estrutura em três etapas, sendo elas:

- Leitura e seleção para o referencial bibliográfico e a definição da jazida para coleta de amostras;
- Ensaios de caracterização, preparação do solo para compactação (utilizando a técnica tradicional de molhagem e a técnica de interesse dessa pesquisa), além de ensaios para avaliação comparativa do comportamento hidromecânico do solo;
- Análise de resultados e considerações finais.

#### **3.2. Local de coleta de amostras**

Optou-se por estudar um solo que se encontrasse no Município de Barreiras – Ba, região Oeste da Bahia, em área urbana. A amostra foi obtida em local de escavação do material onde estava em construção um edifício no bairro Renato Gonçalves.

Visualmente a jazida apresentava coloração amarela e homogênea. O solo foi coletado em novembro de 2019 durante o período chuvoso. A Figura 7 mostra o registro da jazida onde a amostra foi coletada.



Figura 7 - Foto tirada da jazida, localizada no bairro Renato Gonçalves em Barreiras – BA, no dia de coleta da amostra usada nesta pesquisa.

O perfil dos solos típicos da região está caracterizado por processos morfogenéticos que indicam a presença de solos estáveis (aproximadamente 69% da região), erosivos (15%) e deposicionais (16%). O ponto de coleta se encontra em localidade demarcada com estrutura geológica de depósitos aluvionares ou urucuia constituídos majoritariamente de arenitos, areia e cascalho (PASSO et al., 2010) .

### **3.3. Clima e precipitações**

Nesse aspecto de variantes que afetam o desempenho dessas obras, observam-se os efeitos do clima, em especial a umidade. Sabe-se que a Região Oeste da Bahia apresenta uma concentração de 83% das chuvas anuais entre os meses de outubro e abril, segundo Pinto (2006). Como consequência, há um longo período de seca e baixa umidade, essa característica do clima potencializa uma queda no desempenho dessas obras

A empresa Climatempo (2022) desenvolveu o gráfico com os valores de média de precipitação e temperatura por mês no município de Barreiras – BA com base em dados de séries dos últimos 30 anos, a Figura 8 abaixo apresenta os valores fornecidos.

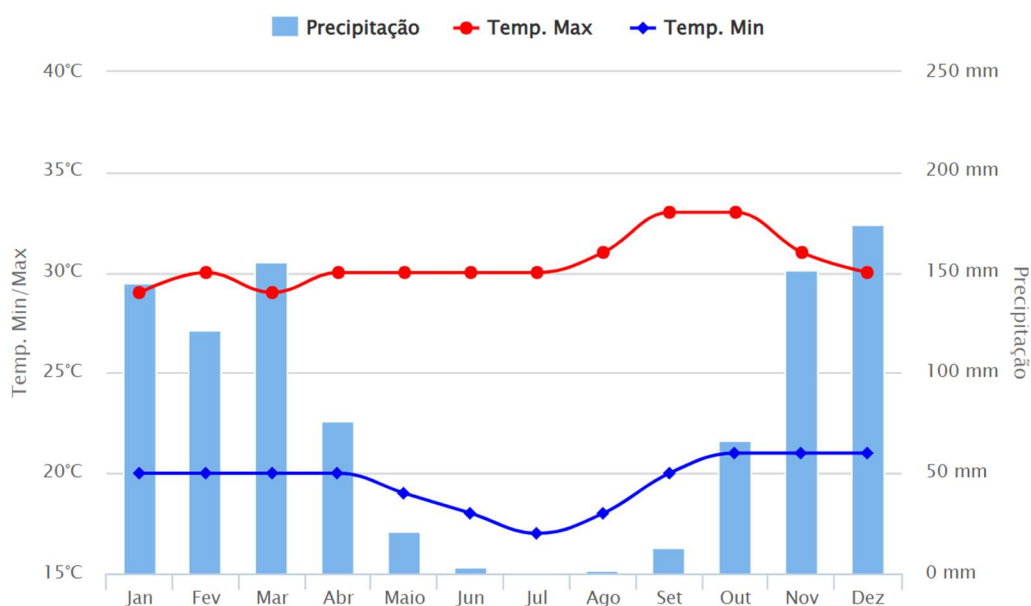


Figura 8 - Valores médios de precipitação e temperatura de Barreiras - BA com base nos dados dos últimos 30 anos. (Modificado de Climatempo, 2002)

### 3.4. Programa experimental

Após a coleta do material, o primeiro passo da análise foi a sua caracterização. O cronograma dos ensaios preparado seguiu inicialmente pela caracterização, que se divide nos ensaios da amostra indeformada e estudo do comportamento da amostra compactada. Visto o objetivo de comparar a influência da diferença de umidade para o comportamento hidromecânico do material, os ensaios realizados seguiram duas formas de preparo do solo para a compactação. O esquema dos procedimentos que foram realizados está exposto na Figura 9.

Para dar início a caracterização tradicional, os parâmetros que Queiroz (2016) aponta os que podem ser obtidos a partir da amostra indeformada do solo. São eles, granulometria (ABNT NBR 7181, 2016), plasticidade (ASTM D4318-10, 2010), compactação (ABNT NBR 7182, 2016), Índice de Suporte Califórnia – CBR (ABNT NBR 9895, 2016), adensamento (DNER - IE 005, 1994) e absorção de água pelo método do papel filtro (ASTM D5298 - 16, 1992).

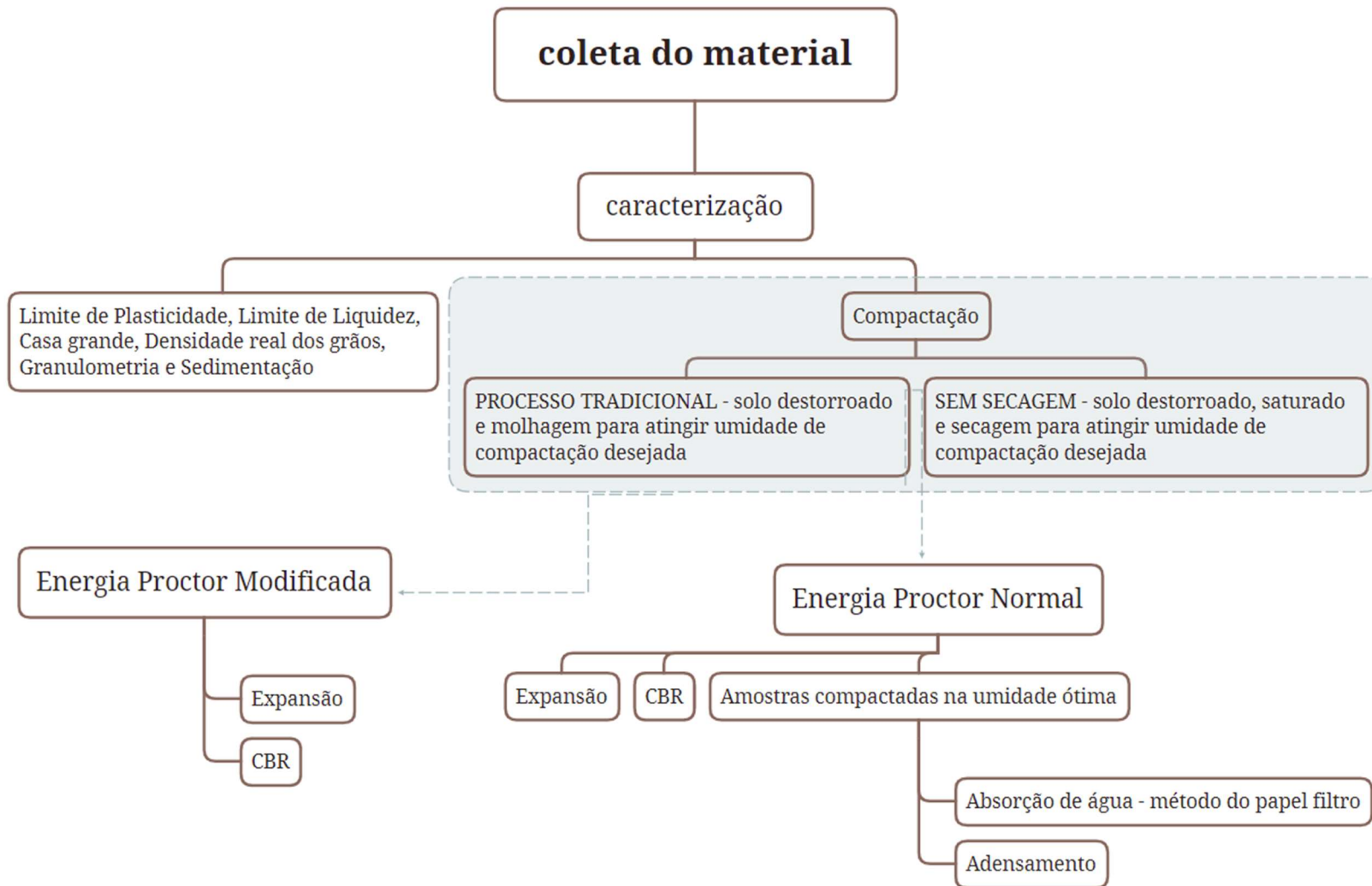


Figura 9 - Programa experimental dessa pesquisa

### 3.1. Ensaio laboratoriais

Para pavimentação é de suma importância conhecer as propriedades do solo trabalhado como camada de pavimento. Para suprir essa necessidade, usa-se dos ensaios de caracterização geotécnica convencional.

#### 3.1.1. Caracterização Geotécnica Convencional

A partir da amostra de solo deformada colhida para análise, utilizou-se a normativa NBR 6457/2016 para preparação de amostras para os ensaios laboratoriais. Os quais foram obtidos os valores correspondentes à:

- Umidade Higroscópica ( $W_0$ ) – NBR 6457/2016;
- Densidade Real dos Grãos (G) – NBR 6508/2016;
- Limite de Liquidez (LL) – NBR 6459/2016;
- Limite de Plasticidade (LP) – NBR 7180/2016;
- Índice de Plasticidade (IP);
- Peso Específico Aparente Seco ( $\gamma_d$ );
- Granulometria com e sem o uso de defloculante – NBR 7181/2016;

Outros dados básicos foram obtidos em laboratório, mas não para caracterização do solo, e sim como base de comparativo na resposta hidromecânica do solo em diferentes procedimentos de umedecimento para a compactação, são eles:

- Compactação Proctor Normal – NBR 7182/2016;
- Índice Suporte Califórnia – Capacidade Suporte CBR – NBR 9895/2017;
- Expansão do solo - NBR 9895/2017.

O primeiro passo realizado para análises em laboratório foi expor o solo ao ar para secagem, do qual foi coletado uma amostra para determinação da umidade higroscópica. Em seguida, ele passou pelo processo de destorroagem, homogeneização e quarteramento, esses dois últimos procedimentos estão expostos na Figura 10 a seguir.



Figura 10 - Solo seco a unidade destorroado

Para a caracterização foi necessário realizar o ensaio de massa específica real dos grãos, conforme procedimento descrito na NBR 6508 (2019), que pode ser observado no aquecimento da amostra para retirada de ar - Figura 11.



Figura 11 – Ensaio de massa específica real dos grãos

Para determinação do limite de plasticidade e índice de plasticidade, segundo orientação da ASTM D4318-17 (2017), e limite de liquidez, pela ABNT NBR 6459 (2016), foram feitos, respectivamente, ensaios por meio de molde cilíndrico do solo e ensaios de Casa Grande. Por fim, o índice de plasticidade foi determinado por meio de cálculo. A Figura 12 abaixo ilustra esses dois ensaios.



Figura 12 - a) ensaio de limite de plasticidade, b) ensaio de liquidez pelo método de Casa Grande e c) Amostras dos ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade secando na estufa a 110°.

Em seguida, para determinar a granulometria, seguindo as orientações da norma ABNT NBR 7181 (2016), foi utilizado o solo destorroado segundo a pesagem orientada. Dessa amostra foram separadas porções nas quais foram executados os procedimentos de peneiramento do grosso, fino e o ensaio de sedimentação, o qual foi realizado com e sem a utilização de defloculante. A Figura 13 mostra os resultados dos peneiramentos e dos ensaios de sedimentação mencionados.



Figura 13 - Ensaio de Granulometria a) peneiramento grosso, b) peneiramento fino, c) preparação de amostra com e sem defloculante e d) ensaio de sedimentação com e sem defloculante após 24h.

### 3.1.2. Comportamento Mecânico

Tendo finalizado esses ensaios padrões, deu-se início à compactação do solo, orientada pela norma nacional (ABNT NBR 7182, 2016). Esse ensaio permite obter a umidade ótima, configuração em que o solo atinge a maior massa específica aparente seca.

Primeiramente o ensaio foi realizado utilizando a Energia Modificada, muito relacionada a energia aplicada em campo em obras de pavimentação. Uma segunda energia, Proctor Normal, também foi utilizada porque nela o solo tende apresentar umidade ótima mais elevada e ser mais fácil extrair corpos de prova para demais ensaios. Para a compactação, utilizou compactador mecânico, Figura 14.



Figura 14: compactador mecânico

De forma a comparar a influência da trajetória de umedecimento, foram seguidas duas metodologias de preparo das amostras de forma paralela, para cada uma das energias de compactação escolhidas.

O primeiro método, a compactação padrão, seguiu todas as orientações da (ABNT NBR 7182, 2016), de solo seco, destorroado e molhado para atingir as umidades de compactação previstas para o ensaio. Esse método será tratado ao longo do texto como Molhagem e está representado pela Figura 15.



Figura 15 - Preparação do solo para compactação pelo processo de molhagem.

A segunda metodologia que foi aplicada no solo destorreado e homogeneizado se deu com o acréscimo de água até a consistência de lama e, posteriormente, aguardou-se a secagem ao ar, a fim de que pela perda de massa a umidade desejada para o ensaio de compactação fosse alcançada.

Essa metodologia de trajetória de secagem ao ar até a umidade de compactação simula o procedimento de aeração feita em campo durante os períodos chuvosos para compactação de solo para camadas de pavimento e será identificada a partir daqui no texto como Secagem. A Figura 16 a seguir mostra como foi realizado esse procedimento.



Figura 16 - Preparação do solo para compactação pelo método de Secagem. a) solo úmido e b) amostra secando ao ar.

Após a compactação, já era perceptível a diferença nas amostras obtidas a mesma energia. Apesar de ambas estarem nas respectivas umidades ótimas, apresentavam diferenças perceptíveis visualmente como a homogeneidade e presença de vazios, conforme é apresentado na Figura 17.



Figura 17 - Amostras de solo compactadas com energia Proctor Normal. À esquerda, mais homogêneo, está a amostra preparada por molhagem, e à direita, com perceptíveis vazios, amostra preparada por método de secagem.

Com esses dois modos de preparo, metodologia padrão (molhagem) e secagem, para as duas energias propostas, foram realizados os ensaios de expansão e determinação o índice de suporte Califórnia – CBR, ambos orientados pela ABNT NBR 9895 (2016). A Figura 18 mostra a realização desses dois ensaios respectivamente.



Figura 18 a) ensaio de expansão do solo b) ensaio de Índice de Suporte Califórnia - CBR

Os próximos ensaios que foram realizados foram adensamento e absorção de água pelo método do papel filtro, utilizaram amostras que foram retiradas de corpos de prova compactados. A proposta inicial era de utilização de ensaios com energia Proctor Modificada, por ser referência nos estudos de pavimentação. Porém, para facilitar a extração das amostras foi adotado a energia Proctor Normal.

Acontece que, ao tentar moldar as amostras a partir dos solos compactados com energia Proctor Modificada, observou-se que o material estava bastante seco e quebradiço, tendo se partido durante as tentativas de extração do molde. Em especial, no que tange ao solo preparado por trajetória de secagem, além de duro e quebrar com facilidade, era perceptível que não havia coesão entre as partículas finas que se soltavam com muita facilidade e impedia que o corpo de prova ficasse moldado de forma homogênea.

Dessa forma, seguindo o critério de facilitar a manipulação do solo, duas amostras, cada uma retirada de um corpo de prova preparado por trajetórias de molhagem diferentes, foram preparadas para a realização do ensaio de adensamento conforme a norma DNER - IE 005 (1994).

Ambas foram compactadas por distintas metodologias, mas com a mesma energia, apresentaram valores diferenciados de umidade ótima de compactação. Para o ensaio de adensamento, cada trajetória foi compactada com a respectiva umidade ótima determinada.

A Figura 19, a seguir, mostra como se deu a realização do ensaio de forma paralela para amostras preparadas pelas duas metodologias propostas. Os carregamentos utilizados foram de 5KPa (carga de contato), carregamentos de 12,5KPa, 25KPa, 50KPa, 100KPa, 800KPa, 1600KPa, e descarregamento com redução para 400KPa, 100KPa, 5KPa e 0KPa, totalizando sete carregamentos e quatro ciclos de alívio de tensões até zerar as cargas.



Figura 19 - ensaio de adensamento do solo realizado em duas amostras preparadas por metodologias distintas.

### 3.1.3. Comportamento hidráulico

A última análise foi sobre o comportamento hidromecânico, que corresponde à retenção de água pela amostra compactada, seguindo a metodologia do papel filtro (ASTM D5298 - 16, 2016). A metodologia adotada seguiu as modificações apresentadas por Marinho (1995), seguida por Menéndez (2016) e Queiroz (2015).

Os cilindros que foram usados para a realização do ensaio apresentam dimensões de 50mm de diâmetro por 25mm de altura. Foram retiradas seis amostras para cada método de preparo do solo compactado a energia Proctor Normal. A Figura 20 mostra os moldes que foram usados e a retirada da amostra para ensaio.



Figura 20 – Cilindros de moldagem para ensaio de absorção de água pelo método do papel filtro.

Para desenvolvimento do ensaio a amostra foi preparada, retirada do corpo de prova e, de forma muito rápida, se iniciou o início do ensaio para que não ocorressem perdas de umidade.

Em contato com uma das faces do solo, foi utilizada a seguinte a sequência de procedimentos: (i) uma camada de papel filtro de 50mm de diâmetro, de forma a evitar contaminação das próximas camadas com o solo; (ii) uma camada de papel filtro de menor raio, devidamente pesada, e da qual será tirado os dados para sucção matricial do solo; (iii) por fim, outra camada de papel filtro de 50mm de diâmetro fechando o sistema.

Para que o ensaio seja preciso, esse sistema foi isolado para que não houvessem perdas de umidade para o meio, para isso foi utilizado uma camada de papel filme, uma de papel alumínio, novamente papel filme e as amostras foram guardadas em uma caixa de isopor.

De posse dos dados, a análise dos dados deste ensaio permitiu em constatar que a variação da umidade no preparo do solo para compactação foi um fator que alterou os resultados dos ensaios de análise do comportamento hidromecânico. Assim, foi possível verificar a validade da hipótese proposta.

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Ensaio de Caracterização Geotécnica

Tendo acesso a amostra deformada para estudo, os primeiros ensaios foram feitos para determinar a umidade higroscópica,  $W_0 = 2,24\%$ , e a densidade real dos grãos,  $G = 2,73 \text{ g/cm}^3$ .

As informações de caracterização básica do solo de limites e massa específica estão organizadas na Tabela 2. A partir dela constata-se que se trata de um solo fracamente plástico.

Tabela 2 - Índices físicos

Ensaio	Solo
Limite de Liquidez (%)	41,27%
Limite de Plasticidade (%)	37,30%
Índice de Plasticidade (%)	3,96%
Massa Específica dos Sólidos ( $\text{g/cm}^3$ )	2,73

O limite de liquidez foi obtido através do gráfico da Figura 21 abaixo, em que pela tendência da reta é possível determinar a umidade necessária para obter o fechamento da fenda do ensaio de Casa Grande usando 25 golpes.

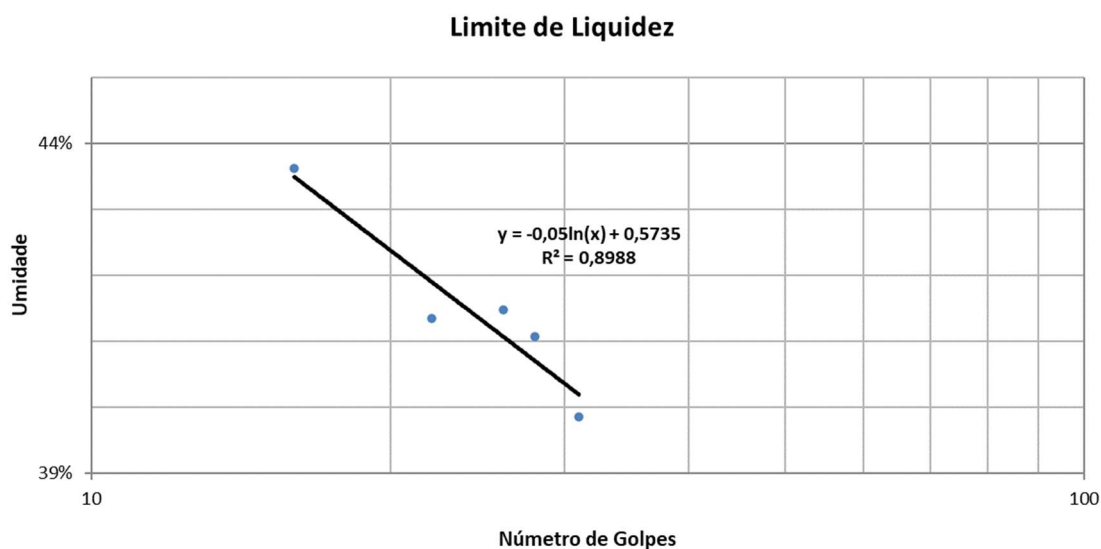


Figura 21 - Limite de Liquidez.

## 4.2. Granulometria com e sem Defloculante

A Tabela 3 abaixo apresenta a distribuição granulométrica obtida a partir do ensaio de granulometria do solo estudado.

Tabela 3 - Distribuição granulométrica com e seu uso de defloculante

Fração do solo	Fração Granulométrica sem Defloculante (%)	Fração Granulométrica com Defloculante (%)
Pedregulho (>2,0mm)	14,45%	14,45%
Areia Grossa (0,6 - 2mm)	38,31%	38,31%
Areia Média (0,2 - 0,6mm)	0,38%	0,38%
Areia Fina (0,06 - 0,2mm)	2,99%	1,99%
Silte (0,002- 0,06mm)	31,92%	12,98%
Argila (<0,002mm)	11,94%	31,88%

Em ambos os casos, a classificação segundo o Highway Research Board (HBR) e adotado pela AASHTO, categorizam o material como siltoso e argiloso. Uma vez que, mais de 30% do solo passa na peneira de nº 200 (0,074mm), no grupo A-5, por ter limite de liquidez acima de 41% e índice de grupo de 2,31.

Pelo Sistema Unificado (SUCS), observa-se que 53% do material fica retido na peneira de nº 200, o que indica um solo de granulação grossa. Para a fração graúda do solo, 38% são de areia média para 14,45% de uma areia com finos.

Por fim, a amostra é classificada como SC-SM, o que indica uma areia silte argilosa. Pelo observado do ensaio de granulometria com o uso de defloculante percebemos se tratar de um SC, areias argilosas.

Abaixo o Figura 22 apresenta as duas curvas granulométricas obtidas para sedimentação sem e com uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio).

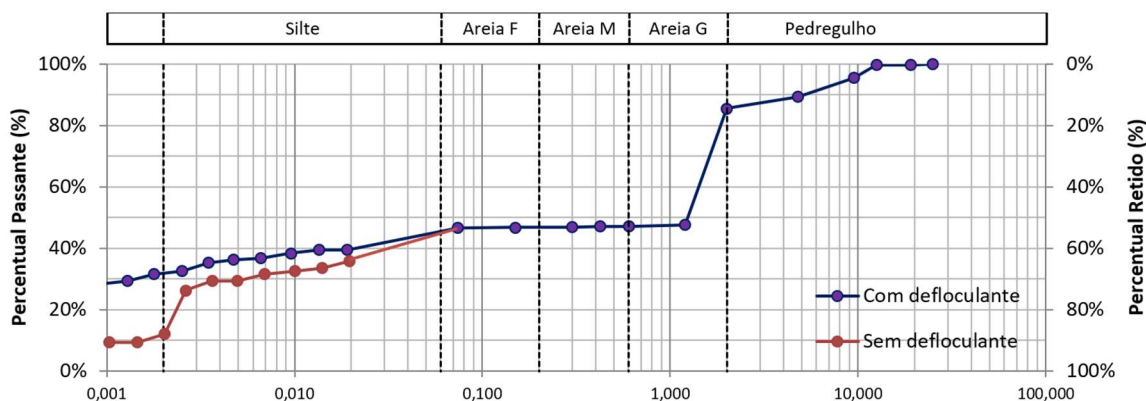


Figura 22 - Curva granulométrica com e sem uso de defloculante

Ambas as curvas indicam, pelo formato, que o solo apresenta granulometria aberta. Trata-se de um solo mal graduação, (MACHADO, 2002).

Tomando como base de cálculo a curva do gráfico de granulometria, para entender melhor as classificações do solo segundo o Sistema Unificado, identifica-se o coeficiente de uniformidade (CNU) pela fórmula:

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

$D_{60}$ : diâmetro dos grãos que se encontram 60% da massa das partículas;

$D_{10}$ : diâmetro dos grãos que se encontram 10% da massa das partículas.

Outro aspecto relevante é o coeficiente de curvatura (CC):

$$CC = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}} \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:

$D_{30}$ : diâmetro dos grãos que se encontram 30% da massa das partículas.

O resultado dessas análises para a curva obtida com uso de defloculante, o  $CNU = 1500$ , solo não uniforme, e como  $CC = 6,67e^{-4}$ , ou seja, menor que 1, significa que há falta de continuidade de grãos com certos diâmetros.

Pela classificação SM-SC, o solo é considerado: de boa trabalhabilidade como material de construção; impermeável quando compactado; quando compactado e saturado, apresenta resistência de regular a boa e pequena compressibilidade; além de, apresentar má características para drenagem.

### **4.3. Ensaio de Compactação, Expansão e CBR**

Os ensaios de Compactação, Expansão e CBR transcorreram em duas metodologias paralelas. Uma em que a amostra de solo foi preparada através da metodologia tradicional de molhagem, a qual consiste em molhar o solo seco a umidade higroscópica para que seja compactado. Outra em que a trajetória de umedecimento segue o processo de secagem de solo úmido até que atinja a umidade desejada para saturação.

Dessa forma, há um comparativo para os resultados dos ensaios descritos considerando as duas trajetórias de preparação. Todos os ensaios demonstrados nesse item do trabalho decorreram da utilização das energias de compactação Proctor Normal e Proctor Modificada.

Abaixo, Tabela 4 apresenta os dados obtidos do ensaio segundo descrito no parágrafo anterior. Com essa base de dados é possível compreender o comportamento do solo de aumento do grau de compactação, maior massa específica, conforme se aumenta a umidade, até um ponto em que a massa específica aparente chega ao máximo. A partir de então é perceptível uma redução do grau de compactação, isso ocorre para umidades acima da ótima, que foi determinada nesse caso no valor de 17,72% com densidade de 1,84g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 4 - Compactação - energia Proctor Normal - método de molhagem

Peso específico KN/m <sup>3</sup>	Umidade Prática (%)
1,664	16,08%
1,687	11,50%
1,715	14,81%
1,757	14,95%
1,761	14,60%
1,780	19,88%
1,833	16,47%
1,836	17,49%
1,835	14,34%
1,854	17,40%
1,870	15,70%

A seguir, Tabela 5, os dados obtidos da compactação da amostra de solo preparada pelo processo de secagem compactado à energia Proctor Normal são apresentados. Da mesma forma que o caso anterior, os valores são usados para determinar a umidade ótima de compactação e a massa específica alcançada.

Tabela 5 - Compactação - energia Proctor Normal - método de secagem

Peso específico KN/m <sup>3</sup>	Umidade Prática (%)
18,39	14,86%
18,18	15,80%
19,12	3,14%
15,89	5,81%
20,22	18,0%
19,62	19,0%
19,34	21,00%
20,74	12,5%
18,01	17,13%
17,89	17,18%
16,67	14,67%

Os dados dos gráficos anteriores permitem determinar a linha de tendência das curvas obtidas e a partir delas determinar a umidade ótima de compactação do solo ( $W_o$ ), a densidade máxima que pode ser alcançada, o índice de vazios e a saturação. O comparativo desses parâmetros para as duas trajetórias de umedecimento está apresentado pela Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 - Tabela resumo do ensaio de compactação para energia Proctor Normal

Processo	$W_o$ (%)	$\delta d$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	Sr (%)	n
molhagem	17,62%	1,84	0,49	98%	32,75%
secagem	12,75%	1,90	0,43	80%	30,24%

Da mesma forma já apresentada, agora indicamos os resultados do ensaio de compactação para amostras preparadas pelas duas metodologias propostas, molhagem e secagem utilizando, nesse momento, a energia Proctor Modificada.

A seguir está a Tabela 7 apresenta os correspondentes de umidade e peso específicos obtidos através do preparo tradicional da amostra.

Tabela 7 - Compactação - energia Proctor Modificada - método de molhagem

Peso específico KN/m <sup>3</sup>	Umidade Prática (%)
1,93	11,61%
1,98	12,60%
2,04	14,62%
1,83	16,42%
1,91	10,63%
1,87	16,52%
1,90	14,05%
1,88	13,73%
1,92	11,74%

Por fim, Tabela 8 abaixo apresenta a curva característica obtida do solo preparado através do procedimento de secagem e posterior compactação à energia Proctor Modificada.

Tabela 8 - Compactação - energia Proctor Modificada - método de secagem

Peso específico KN/m <sup>3</sup>	Umidade Prática (%)
1,920	14,86%
1,864	15,80%
1,937	4,72%
1,980	10,00%

Seguindo o mesmo procedimento demonstrado para a energia Proctor Normal, os parâmetros para a curva de compactação foram repetidos. Os resultados obtidos para a energia Proctor modificada, segundo as duas metodologias de preparo das amostras, estão expostos de forma comparativa na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 - Tabela resumo do ensaio de compactação para energia Proctor Modificada

Processo	Wo (%)	$\delta d$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	Sr (%)	n
molhagem	12,54%	1,94	0,41	100%	29,14%
secagem	10,55%	2,04	0,34	85%	25,21%

As mesmas amostras utilizadas para o ensaio de compactação foram submersas em tanque com água durante 3 (três) dias para assim fornecer os dados de expansão e de CBR.

Na Figura 23, temos as curvas do ensaio CBR referente a amostra preparada por meio da trajetória de molhagem e compactada à energia Proctor Normal.

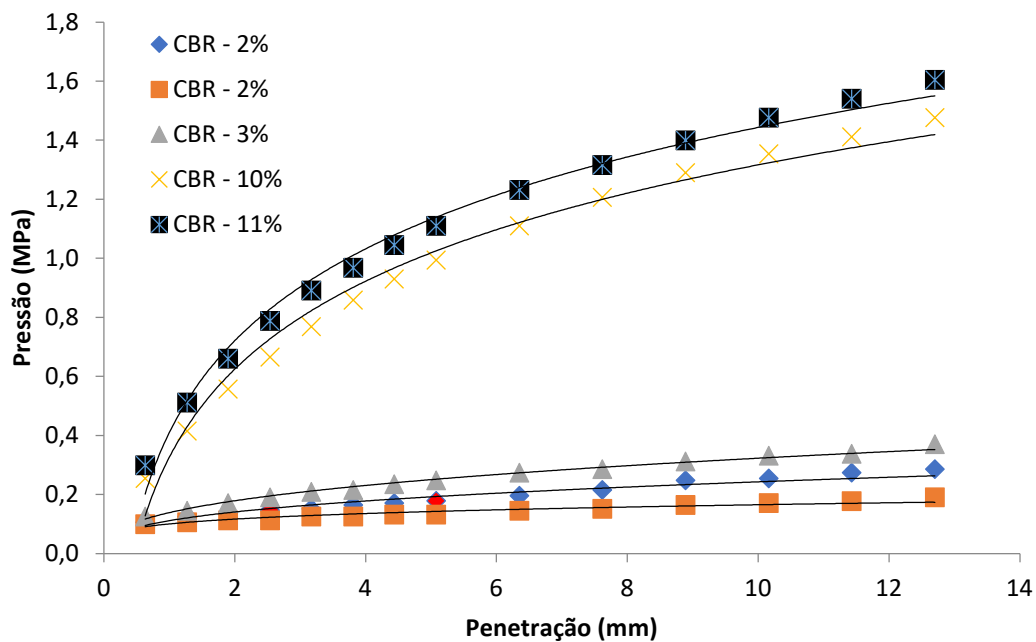


Figura 23 - Curvas de Pressão x Penetração para Molhagem energia Proctor Normal

Com os dados da curva apresentada é possível determinar o CBR do solo compactado de acordo com a umidade do mesmo.

De forma similar, os dados do procedimento de ensaio CBR se obtve pelo gráfico da penetração do pistão da célula de ensaio no solo confinado pela tensão aplicada. O gráfico da Figura 24 se refere ao ensaio das amostras preparadas por secagem e compactados com energia Proctor Normal.

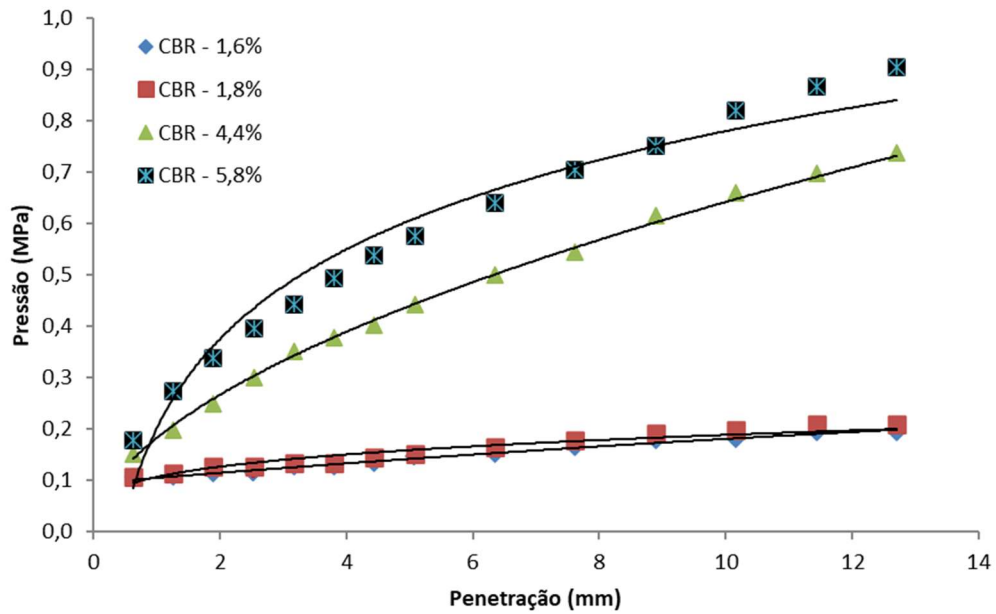


Figura 24- Curvas de Pressão x Penetração para Secagem energia Proctor Normal

Desses gráficos são extraídos os dados de CBR para o solo compactado com energia Proctor Normal, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores de CBR para energia Proctor Normal

Umidade	CBR
Molhagem	
14,6	2,12%
15,7	11,44%
17,4	9,66%
14,95	2,77%
14,81	1,65%
Secagem	
14,86	4,35%
15,8	5,75%
3,14	1,65%
5,81	1,84%

O mesmo procedimento apresentado se repete para as amostras compactadas com energia Proctor Modificada. Primeiramente, a Figura 25 apresentada foi obtida por meio das amostras preparadas pelo método tradicional de molhagem.

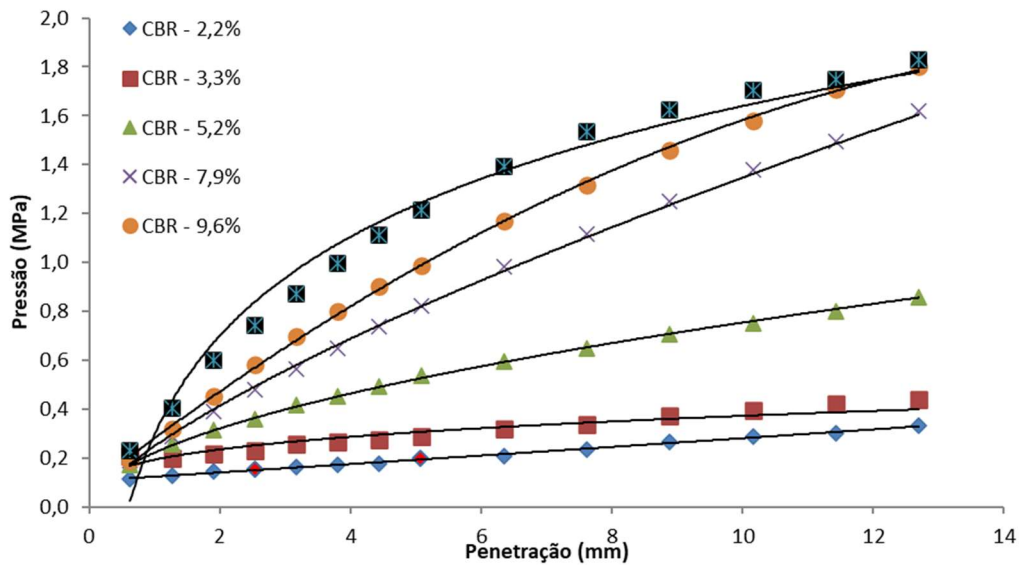


Figura 25 - Curvas de Pressão x Penetração para Molhagem energia Proctor Modificada

A seguir, Figura 26, gráfico das curvas de ensaio CBR para amostras compactadas com energia Proctor Modificada e preparadas pelo processo de secagem.

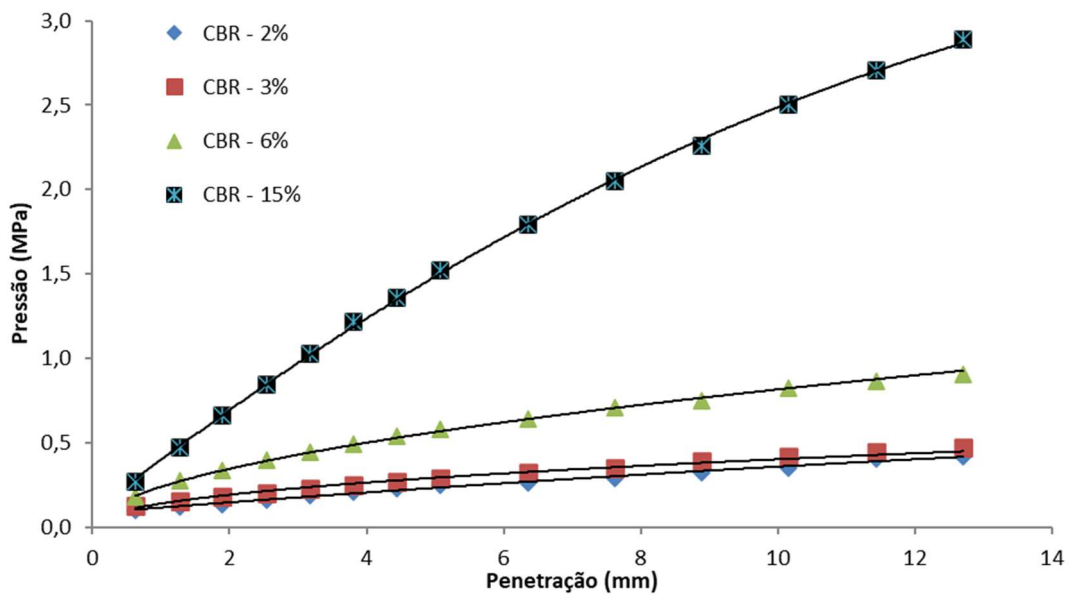


Figura 26 - Curvas de Pressão x Penetração para secagem energia Proctor Modificada

Pelos dados do último gráfico, foi possível construir a curva de CBR em função da unidade do solo para a energia Proctor Modificada.

A seguir estão expostos os dados da expansão das amostras observadas após três dias no tanque de imersão. Na Tabela 11 de forma comparativa, estão os dados de expansão para o solo compactado com energia Proctor Normal para ambas as trajetórias de umedecimento trabalhadas.

Tabela 11 - Expansão x Umidade - energia Proctor Normal

Molhagem	
Umidade (%)	Expansão (%)
12%	0,22
14,81	12,53
14,95	7,89
18,00%	-3,30
Secagem	
3,14%	-3,10
5,81%	-0,11
14,86%	18,26
15,80%	-0,92

De forma similar, a Tabela 12 traz os dados de expansão do solo compactado com energia Proctor Modificada das amostras preparadas por método de secagem e molhagem juntos.

Tabela 12 - Expansão x Umidade - energia Proctor Modificada

Umidade	Expansão
Molhagem	
2,21%	3,37
3,33%	0,35
5,20%	0,27
7,93%	0,91
9,55%	4,51
11,72%	1,23
Secagem	
4,10%	-28,32
4,72%	-27,73
14,86%	-21,84
15,80%	-0,88

#### 4.4. Adensamento unidimensional

Uma vez que foram determinados os valores de umidade ótima para cada energia de compactação, realizou-se os ensaios de adensamento. Vale reforçar que, por motivos de facilitar a extração de moldes, para essa análise foi optado pelo uso da energia Proctor Normal.

A seguir são apresentadas as curvas características do processo de adensamento indicando o índice de vazios em função da tensão aplicada obtida ao fim de cada variação de carga (carregamento ou descarregamento).

A Figura 27 abaixo mostra o comportamento do solo compactado a energia Proctor Normal, o qual se preparou segundo a metodologia tradicional de molhagem. Está detalhado o processo para determinação da tensão de pré-adensamento conforme a metodologia de Taylor.

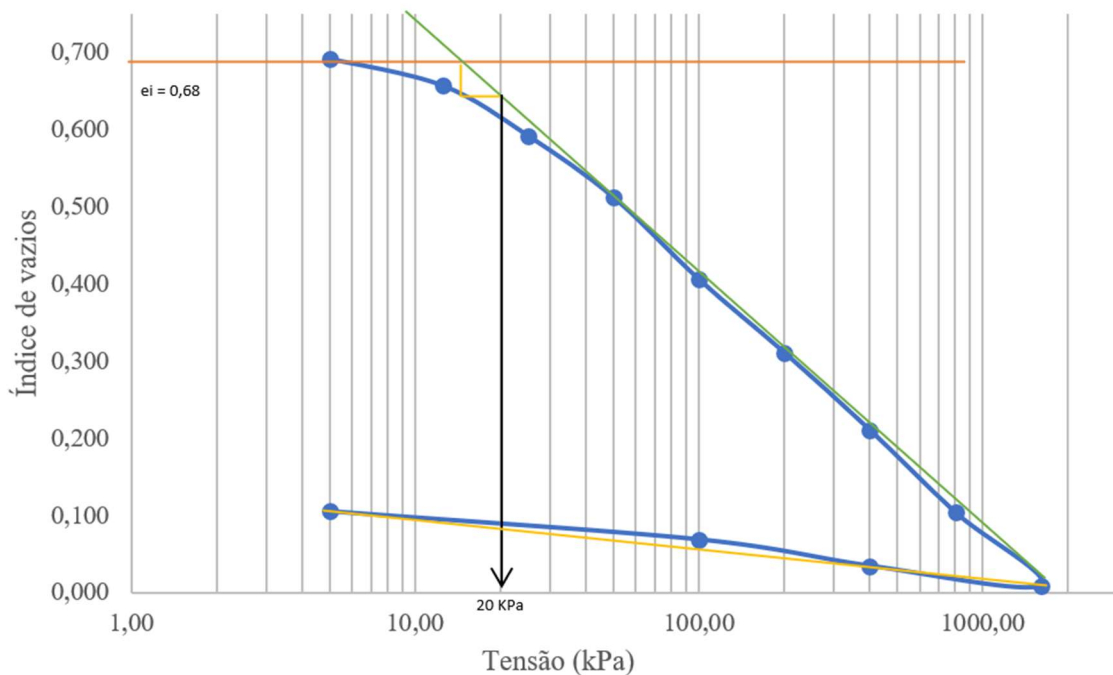


Figura 27 - Adensamento - Molhagem

A Figura 28 abaixo é similar a anterior, no entanto apresenta os dados segundo o método de secagem.

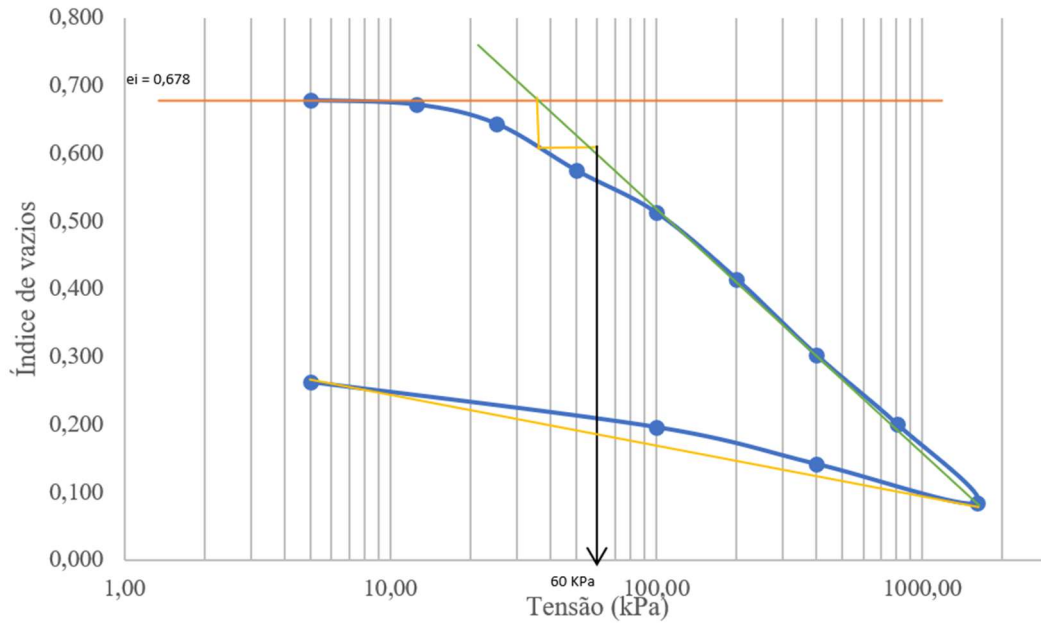


Figura 28 - Adensamento - Secagem

Desses dados apresentados e representados nas curvas apresentadas acima foram obtidos os índices de compressibilidade do solo, tensão e de deformação que estão expressos na Tabela 13 a seguir.

Tabela 13 - Tabela resumo do ensaio de adensamento - energia Proctor Normal

Índices	Trajétória Molhagem	Secagem
C.C. - Índice de compressão no trecho virgem	0,329	0,3562
C.R. Índice de compressão no trecho descarregado	0,037	0,0621
$\sigma'_{pa}$ - Tensão de pré-adensamento	20 KPa	60 KPa
$\epsilon$ - Deformação específica vertical	9,49%	8,93%

Outra questão a ser observada é o comportamento dos solos durante cada ciclo de variação de carga. Essas curvas também serão utilizadas para determinação do coeficiente de adensamento (C.V.) e de deformação vertical específica ciclo a ciclo.

A seguir, na Figura 29, está exposto a curva para os carregamentos de 12,5 KPa até 1.600KPa, sendo dobrado as cargas durante o carregamento. Diante disso, refere-se ao solo preparado pelo método de molhagem durante o processo de aumento de carga, característico pelo procedimento de adensamento do solo.

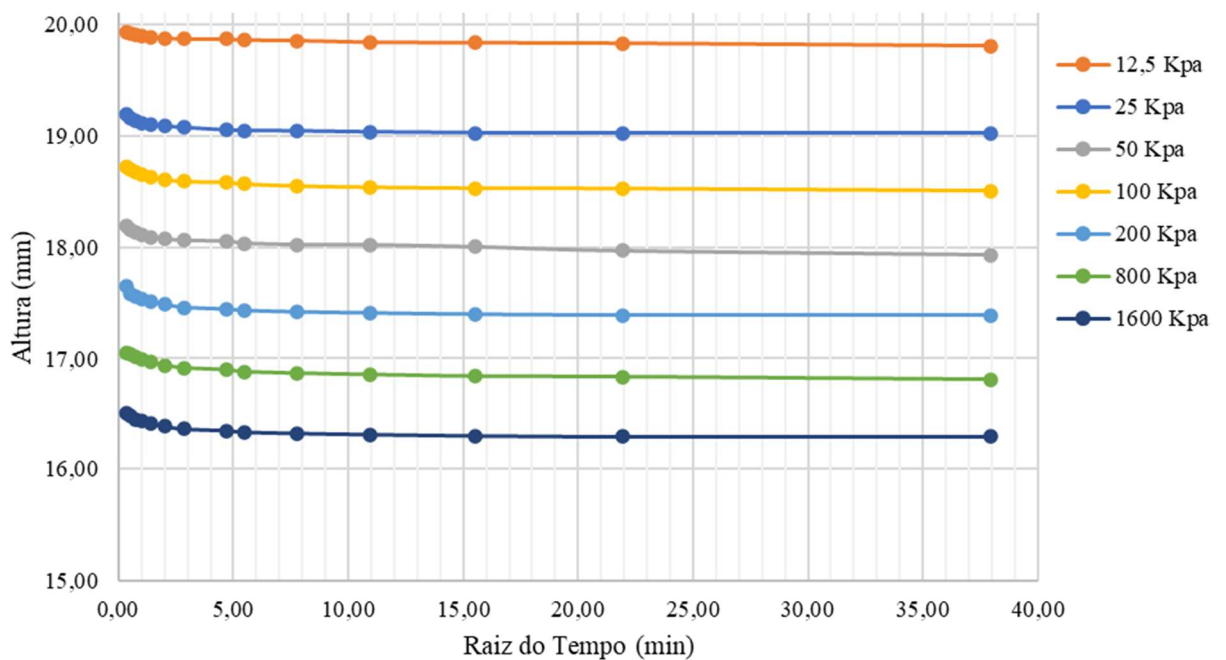


Figura 29 - Altura x Raiz do tempo - Carregamento - Molhagem

De forma a complementar a análise para o processo de molhagem, a Figura 30 mostra o processo de descarga e a carga de contato. Em todos esses casos, o comportamento da curva se difere do anterior por retratar um procedimento de expansão do solo.

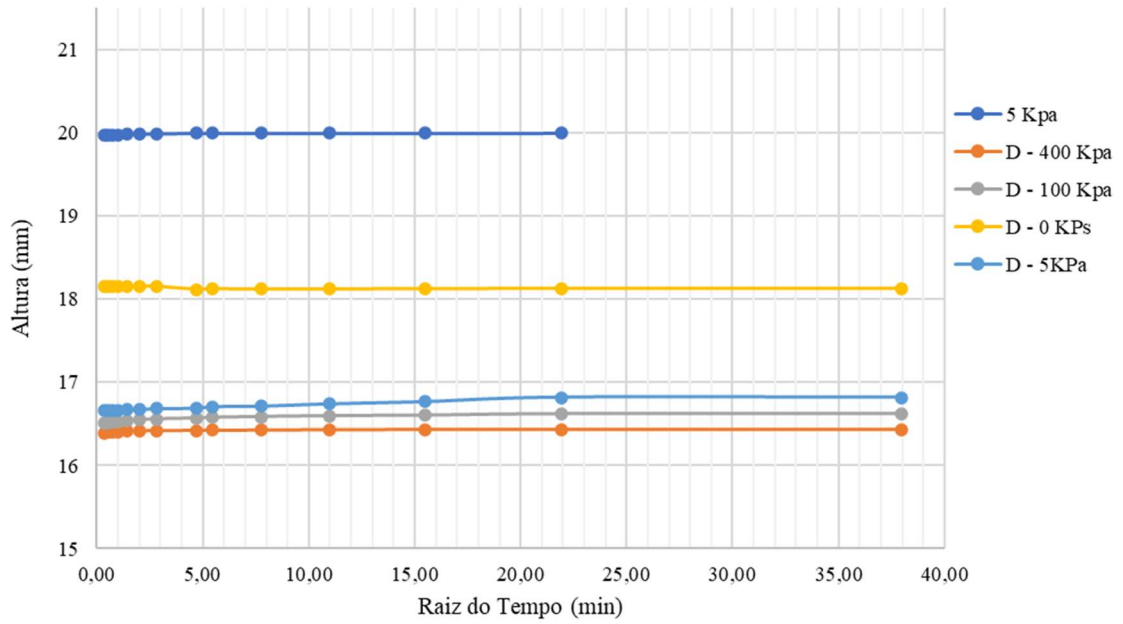


Figura 30 - Altura x Raiz do tempo - Carga de contato e Descarregamento - Molhagem

Agora, para os dados do ensaio feito em um solo preparado pelo método de secagem é apresentado a seguir a Figura 31. Segue as curvas para o acréscimo de cargas seguindo os mesmos valores de tensão aplicada do ensaio de para solo preparado por molhagem.

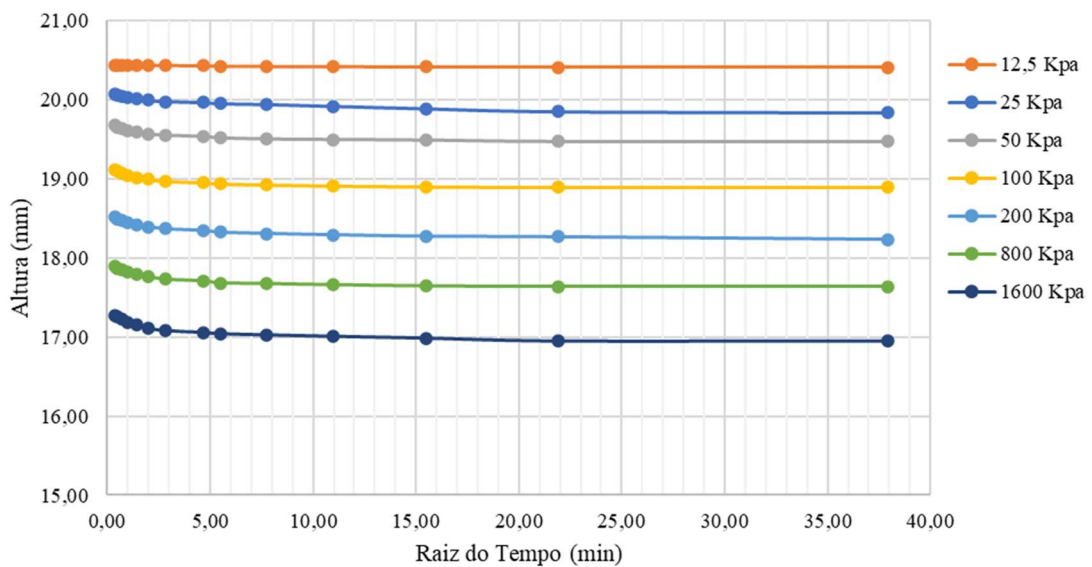


Figura 31 - Altura x Raiz do tempo - Carregamento - Secagem

Por fim, as curvas características para alívio de tensões e de curva de contato para solo preparado por secagem, que novamente expressão um processo de expansão do solo, estão apresentadas na Figura 32 abaixo.

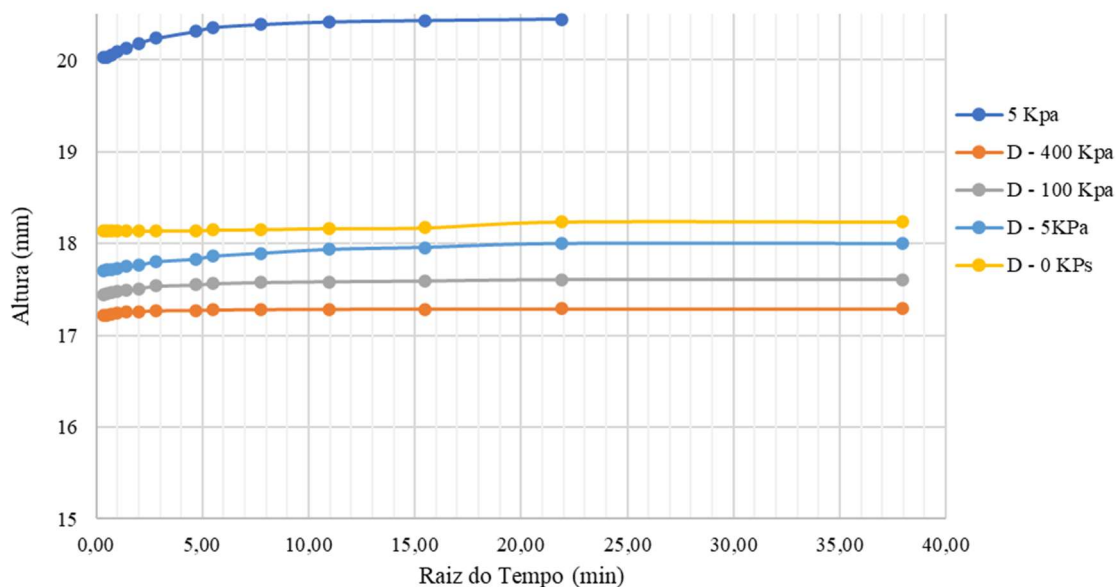


Figura 32 - Altura x Raiz do tempo - Carga de contato e Descarregamento - Secagem

Os dados de deformação específica obtidos estão apresentados na Tabela 14 abaixo.

Tabela 14 - Tabela de deformação específica vertical - energia Proctor Normal

Deformação específica vertical	Trajetória	
	Molhagem	Secagem
$\epsilon$ total	9,49%	8,93%
$\epsilon$ 5	0,15%	-2,09%
$\epsilon$ 7,5	0,94%	0,18%
$\epsilon$ 12,5	1,76%	0,83%
$\epsilon$ 25	2,16%	2,03%
$\epsilon$ 50	2,88%	1,83%
$\epsilon$ 100	2,57%	2,88%
$\epsilon$ 200	2,71%	3,31%
$\epsilon$ 400	2,89%	2,97%
$\epsilon$ 200	-0,68%	-1,68%
$\epsilon$ 25	-0,92%	-1,60%
$\epsilon$ 5	-0,99%	-1,96%
$\epsilon$ 0	-6,54%	-1,19%

Por fim, os dados de coeficientes de adensamento para cada acréscimo de tensão estão apresentados na Tabela 15. Nela consta os resultados calculados tanto para a trajetória de umedecimento por molhagem quanto por secagem.

Tabela 15 - Coeficiente de adensamento - energia Proctor Normal

Tensão aplicada (KPa)	C.V. Coeficiente de adensamento (m <sup>2</sup> /dia)	
	Trajetória	
	Molhagem	Secagem
7,5	0,0540	0,0024
12,5	0,0299	0,0050
25	0,0190	0,0248
50	0,0699	0,0300
100	0,0268	0,0222
200	0,0527	0,0293
400	0,0150	0,0130
800	0,0244	0,0187

#### 4.5. Curva de retenção de água

O último ensaio realizado, absorção de água, sucedeu-se pelo método do uso do papel filtro com ensaio feito com duração de 14 dias para o valor da sucção matricial. As mesmas dificuldades para extração de amostras para corpos de prova compactados com energia Proctor Modificada apresentados para o ensaio de adensamento, em que as o material se mostrava quebradiço e com partículas finas se desprendendo da amostra. Dessa forma, decidiu-se por realizar o ensaio usando a mesma energia de compactação dos ensaios anteriores, a energia Proctor Normal.

Segue abaixo na Figura 33 o gráfico que mostra a umidade gravimétrica pela sucção do solo. Os dados para amostra preparada por molhagem e secagem são apresentados juntos para facilitar a comparação do comportamento da curva para cada metodologia de preparo dos corpos de prova.

E perceptível a continuidade na curva para ambas as metodologias de preparo do solo, porém, com valores de umidade gravimétrica menores para o método de secagem quando comparado ao método de molhagem.

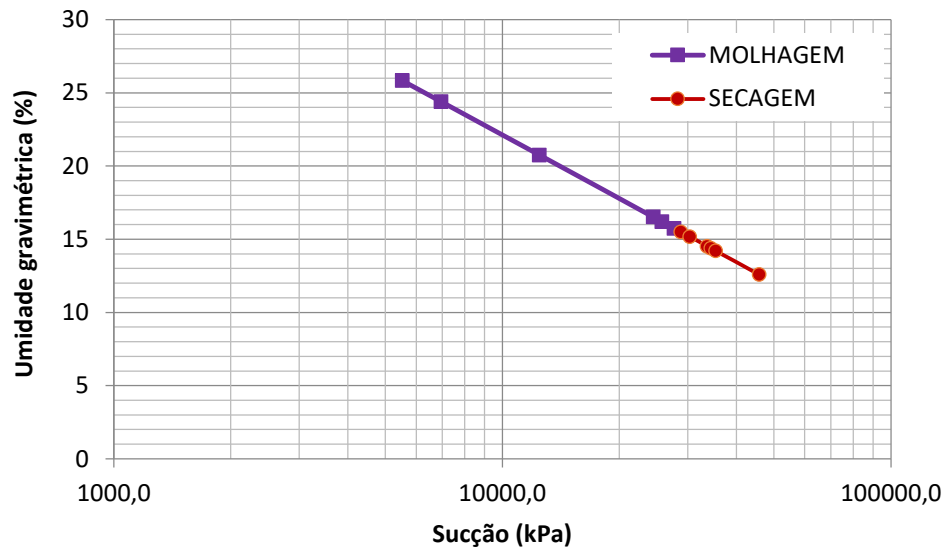


Figura 33 - Umidade gravimétrica x Sucção

## **4.6. Análise dos Resultados**

### **4.6.1. Caracterização**

Na caracterização, foi perceptível como o uso do defloculante foi importante para entender a real distribuição granulométrica. Apesar de ambos os ensaios, sem e com defloculante, determinarem o mesmo tipo de solo, A-5, esta mostrou uma grande diferença para a composição de finos. Em que mais de 30% da amostra, inicialmente determinada como sendo argila e pouco mais de 10% de silte, mostrou-se trocada com a presença de defloculante.

A presença, na realidade, é de 10% de silte e 30% de argila. Esta, por ser a fração mais fina do solo, influencia diretamente na sua expansão, nos valores de adensamento e no tempo de estabilização do ensaio de adensamento.

De forma geral, o solo estudado não é indicado para uso em camadas de pavimento, mas serve ao propósito comparativo dos ensaios. Mesmos os altos valores para expansão e o baixo CBR, apesar de inadequado para uso como base, leito ou subleito, apresentaram relevantes mudanças no comportamento hidromecânico a depender da trajetória de umedecimento adotada. Essa mudança foi suficiente para comprovar os efeitos do método na resposta do solo compactado.

### **4.6.2. Compactação**

A análise dos dados obtidos pelo ensaio de compactação permite observar como o solo se comporta quando preparado por diferentes trajetórias de umedecimento. Tanto para a energia Proctor Normal quanto para a energia Proctor Modificada, o que se observou foi uma redução na umidade ótima de compactação quando comparado o solo preparado pelo método tradicional, molhagem.

Para a compactação com menor energia essa diferença foi mais perceptível. A umidade ótima de compactação da amostra preparada por secagem apresenta uma redução de 4,87% em comparação com a amostra preparada por molhagem. A redução desse parâmetro tem como resultado acréscimo de massa específica final, redução em 0,06 do índice de vazios, redução em 2% da saturação e redução de 2,51% da porosidade.

Porém, um aspecto deve ser levado em consideração. Espera-se que a redução dos vazios e aumento da massa específica se reflète em um aspecto favorável para a

resistência a cargas do solo, mas se que não ocorre ao aumento do resultado de CBR nessas condições.

Outro ponto relevante é que os dados dos ensaios laboratoriais fornecem uma umidade ótima do solo preparado por molhagem. Em campo, durante o período de chuvas, não seria executada à umidade de secagem. Dessa forma, o solo não alcançaria a máxima compactação possível, o que aponta para uma divergência entre a melhor forma de trabalhar a amostra com os dados que os ensaios laboratoriais apresentariam.

Da mesma forma, para o ensaio com energia Proctor Modificada, foi constatado redução de 1,99% da umidade ótima de compactação para as amostras preparadas por secagem. Consequentemente, houve aumento da massa específica, redução de 0,07% do índice de vazios, redução de 15% na saturação da amostra compactada e redução de 3,93 na porosidade.

#### **4.6.1. Índice de Suporte Califórnia - CBR**

As curvas do ensaio CBR, novamente, mostram uma diferença no comportamento dos solos preparados com trajetórias de umedecimento mais acentuada para a energia Procto Normal. Para a maior energia, Proctor Modificada, o que ocorre é um deslocamento da curva no sentido de diminuição da umidade necessária para se atingir o mesmo CBR.

Para a energia Proctor Normal é visto que o solo preparado pelo método convencional de molhagem tem umidade ótima de 17,62% e quando compactado nessa energia atinge o maior CBR da curva no valor de 13%. Em contrapartida, o solo preparado por método de secagem, com umidade ótima de 12,75%, quando compactado nessas condições de umidade e energia alcançada é de CBR de 5%.

Considerando a curva que descreve o comportamento de CBR em função da tensão é possível saber como o solo se comportaria ao ser compactado em outra umidade. Assim, se o solo preparado por secagem em obra durante um período chuvoso for compactado com a umidade ótima do solo preparado por secagem, 17,62%, alcançaria CBR de 5,5%. Fica nítido assim, que para a energia Proctor Normal há uma clara redução no desempenho mecânico do solo preparado com processo de secagem.

Essa queda no desempenho é menor para a energia Proctor Modificada. Considerando o método tradicional, molhagem, a umidade ótima de compactação é de

12,54%, para a qual o CBR é de 12%. Já a mostra preparada por secagem tem umidade ótima de 10,55%, para a qual alcança 13,7% de índice CBR. Nesse caso, há uma melhora no índice que indica a resistência.

Novamente, recorreremos à curva do gráfico CBR em função da tensão, para compreender o comportamento do solo preparado por meio de secagem. Se a amostra fosse preparada com umidade de 12,54% ele alcançaria 11% de CRR. Logo, há um prejuízo, não tão drástico, de se usar os dados de uma metodologia, molhagem, para preparar um solo compactado e preparado com outro método, secagem.

#### **4.6.2. Expansão**

De forma geral, o comportamento do solo quanto à expansão mostra que, independentemente da energia de compactação usada, há predominância de expansão das amostras preparadas por molhagem e retração para as preparadas por secagem. Percebe-se uma configuração semelhante à reta normal, em que as medidas maiores nas porções centrais e menores nos extremos.

Assim, para a energia normal, os dados para o método de secagem mostram que a maior expansão foi observada abaixo da umidade ótima, 14,81% com um valor de 13%. Para o método de secagem, a maior expansão foi à umidade de 14,86% e teve valor registrado de 18%, e alcançou 4% de retração conforme se distanciava dessa umidade.

Para a compactação com energia Proctor Modificada o comportamento foi similar, mas com redução dos valores de expansão. Para as amostras preparadas por molhagem a máxima expansão foi de 5% e foi observada em uma umidade de compactação de 9,55%. As amostras que seguiram o método de secagem tiveram retração máxima de 27,73%.

Assim, as maiores variações do volume das amostras ocorreram nos corpos de prova preparados por secagem, eles também apresentaram evidente comportamento de retração. Todos esses valores de elevada variação de altura do corpo de prova são desfavoráveis para o uso de solos para pavimentação.

#### **4.6.3. Adensamento Edométrico**

Os dados sobre o ensaio de adensamento, conforme apresentado anteriormente, corresponde as duas trajetórias para umedecimento das amostras, ambas compactadas com energia Proctor Normal.

É possível verificar, conforme a Figura 34, que ambas as curvas tiveram comportamento padrão esperado, apenas com a curva de secagem mais abaixo da curva para molhagem. Essa configuração mostra que em menor tensão aplicada sobre o solo está mais bem compactado, com menos vazios. Vale ressaltar, a compactação é um fator relevante para o suporte de cargas do solo utilizados em pavimentos.

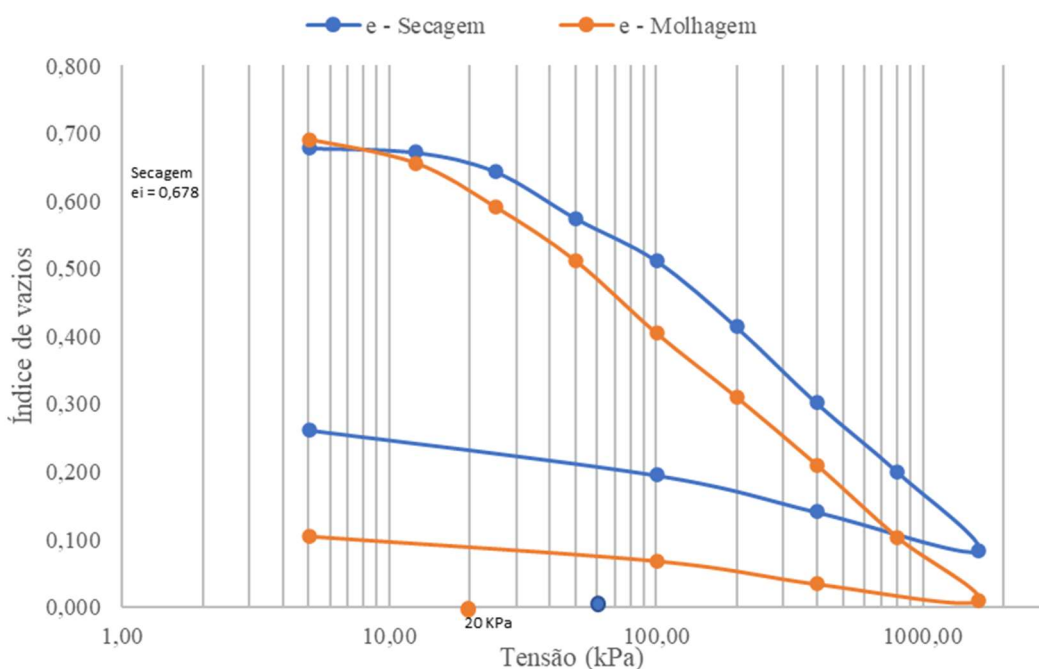


Figura 34 - Adensamento pelos métodos de molhagem e secagem

Os dados obtidos pelas curvas de adensamento mostram que o índice de compressão no trecho virgem é maior em 0,03 para a amostra preparada pelo método de secagem. Para mais, apresentou aumento de 0,025 no índice de compressão no trecho descarregado, além de aumento de 35 KPa para a tensão de pré-adensamento, mas a deformação específica vertical reduziu em 0,56.

As deformações verticais foram maiores na amostra preparada por molhagem, método tradicional, durante as primeiras cargas até 50KPa. Para os demais carregamentos e descarregamentos os valores parciais, bem como a deformação total, foram maiores para a amostra obtida por secagem.

Assim, o solo preparado à umidade ótima seguindo o procedimento de secagem tem maior coeficiente de adensamento. Dessa forma, alcança a estabilidade das deformações mais rápido.

#### **4.6.1. Curva de retenção de água**

O comportamento da curva de retenção se deu de forma linear o que mostra uma perfeita continuidade no comportamento do solo. Porém, o posicionamento das curvas é um reflexo direto da compactação.

Conforme o ensaio de compactação, a umidade ótima do solo preparado pelo método de secagem é menor do que o preparado por molhagem. Portanto, a umidade da amostra de solo já é menor e como consequência as medições do papel filtro também ocorrem valores menores de umidade. Pelo padrão da própria curva, para menor umidade é relacionado à maior sucção no solo, ou seja, é mais difícil retirar a água da estrutura.

Porém, um aspecto relevante é sobre o formato da curva. Seria esperado que a diminuição da umidade ocasionasse em pouca alteração da sucção, gerando uma curva suave, próximo ao formato de um 'S', e não uma reta tão característica. Isso mostra, que pelo processo de secagem o solo compactado retém de forma significativa a água em sua estrutura.

## 5. Considerações finais

### 5.1. Conclusões

Foi constatado, conforme previsto na hipótese do projeto e conforme esperado pela literatura, que o comportamento hidromecânico do solo apresenta diferenças quando preparado com distintas trajetórias de molhagem.

A umidade ótima de compactação para o solo preparado por secagem é menor do que a do solo preparado por molhagem. Com isso, o comportamento do material compactado em campo durante os períodos chuvosos, que se assemelham ao processo de secagem, não alcança todos os parâmetros determinados em laboratório, processo de molhagem.

De forma mais clara, a resistência do solo medida pelo Índice de suporte Califórnia teve clara redução em comparação com o método tradicional. Em especial para energia Proctor Normal, em que o solo preparado por secagem ao ar teve aumento de  $0,06\text{g/cm}^3$  da massa específica, o que poderia supor que o material foi muito bem compactado e terá a mesma resposta hidromecânica determinada nos ensaios de laboratório. Porém, o que de fato ocorre é uma redução de CBR de 13% cai para 5,5%.

Essa variação do CBR é menor a energia Proctor Modificado, em que para um aumento da massa específica de  $0,10\text{g/cm}^3$  foi constatada aumento em 0,5% do CBR.

O caso do solo analisado pela trajetória de secagem apresentou alta retração, aspecto que não ocorre na umidade ótima para o método tradicional. Para a energia Proctor Normal, além da retração, observou-se que a expansão do material quando preparado por secagem na umidade ótima do método de molhagem obteve expansão maior. Assim, a mudança do método gera alteração da expansão do solo em condição de saturação, apresentando maiores variações do volume da amostra.

No adensamento, a trajetória de molhagem mostrou que o solo se deforma rapidamente tanto para o processo de carga quanto de descarga. Esse processo também se dá de forma mais rápida devido ao tempo comparativo de estabilização da amostra.

Por fim, no comportamento hidráulico, o solo que passou por secagem apresenta maior capacidade de reter a água em sua estrutura. Apresenta também, acréscimo acentuado, numa tendência linear, da pressão necessária para retirada da água do solo enquanto reduz a umidade.

## **5.2. Sugestões para pesquisas futuras**

A partir dos dados obtidos, ficam as sugestões para aprofundar o entendimento da diferença do comportamento hidromecânico do solo preparado por meio da trajetória de secagem:

- Repetir os ensaios para solo preparado pelo método de secagem, mas com a umidade ótima do método de molhagem;
- Expandir os pontos da curva de retenção de água pelo papel filtro, sobrepondo os valores de umidade e análise do respectivo valor de sucção;
- Ensaio de placa para determinar os valores de sucção que o método do papel filtro não engloba.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABITANTE, A. L. **Estradas**. 1ª. ed. Porto Alegre: Grupo A, 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 6459. **Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 7181. **Solo - Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 7182. **Solo – Ensaio de compactação**, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 9895. **Solo – Índice de Suporte Califórnia**. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR ISO 12957-1. **Geossintéticos - Determinação das características de atrito - Parte 1: Ensaio de cisalhamento direto**. Rio de Janeiro, 2013.

ALBUQUERQUE, P. J. DE; GARCIA, J. R. **Engenharia de fundações**. LTC, 2020.

ALMEIDA, L. N. DE; SOUZA, S. A.; CARVALHO, A. DOS S. DE; TELES, E. B. DE S.; SILVA, M. A. V. **Estudo da Precipitação Efetiva para o Município de Barreiras - BA**. p. 1–8, 2017.

ANTUNES, G. C. **Patologias Em Estradas Ocorridas Por Compactação Deficiente**. Manhuaçu: Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu, 2017.

American Society for Testing and Materials - ASTM D2435/D2435M - 11. **Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading**. ASTM Standards, 2020.

American Society for Testing and Materials - ASTM D3080/D3080M. **Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. West Conshohocken, ASTM International, 2011.

American Society for Testing and Materials - ASTM D4318-10. **Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils**, 2010.

American Society for Testing and Materials - ASTM D5298 - 16. **Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper**. ASTM Standard, 1992.

BARNES, G.; TIBANA, S. **Mecânica dos Solos - Princípios e Práticas**. 3. ed. LTC, 2016.

BATISTA, C. F. N. **Ensaio Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis**. 2. ed. Porto Alegre: Editora Globo, v.1, 1976.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. DA; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.

BERTOLAZI, V. T. **Concentração de Argilominerais 2:1 em Solos Subtropicais**. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

BORGES, C. R. **Estudo microestrutural do comportamento hidromecânico do solo de Brasília - DF**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2014.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, J. M. DE A. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações - Exercícios e Problemas Resolvidos**. 7<sup>a</sup>. ed. LTC, v.3, 2015.

CHRYSTELLO, A. C. **Avaliação De Curvas De Calibração Do Método Do Papel Filtro Tipo Whatman Nº42 Utilizadas Para Estimar Sucção Matricial Em Solos Não Saturados**. Vitória - ES: Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

CLIMATEMPO. **Climatologia e histórico de previsão do tempo em Barreiras, BR**.

CONTESSI, R. J. **Borehole Shear Test: Uma Comparação Com O Ensaio De Cisalhamento Direto**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

DÍAZ-CORAL, J. M.; VALENCIA-GONZÁLEZ, Y.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Validación de una metodología para obtener la envolvente de ruptura al esfuerzo cortante en suelos no saturados compactados**. Entramado, v. 17, n. 1, p. 290–301, 29 jan. 2021.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER - IE 005. **Solos - Adensamento**, 1994.

Departamento Nacional Infraestrutura de Transportes - DNIT 031. **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ES, 2006.

Departamento Nacional Infraestrutura de Transportes - DNIT 137. **Pavimentação - Regularização do subleito - Especificação de serviço**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ES, 2010.

Departamento Nacional Infraestrutura de Transportes - DNIT 138. **Pavimentação - Reforço do subleito - Especificação de serviço**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ES, 2010.

Departamento Nacional Infraestrutura de Transportes - DNIT 139. **Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ES, 2010.

Departamento Nacional Infraestrutura de Transportes - DNIT 141. **Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ES, 2010.

DRESCH, F. **Projeto de Estradas**. Grupo A, 2018.

DUCA, G. P. R. DEL. **Programação Em VBA Para Ensaio De Adensamento De Solos Saturados E Não Saturados Com Bolhas De Ar Oclusas**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2015.

FIORI, ALBERTO P. **Fundamentos De Mecânica Dos Solos E Das Rochas – Aplicações Na Estabilidade De Taludes**. 3<sup>a</sup>. ed. 2015.

- FLORIANO, C. **Mecânica dos Solos Aplicada**. 1ª. ed. Porto Alegre: ABDR, 2017.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. 1ª. ed. Wiley Interscience, 1993.
- ISO 12957-1. **Geosynthetics - Determination of friction characteristics - Part 1: Direct shear test**, 2018.
- KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**. 23ª. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2012.
- MARINHO, F. A. M. **A técnica do papel filtro para medição de sucção**. Encontro sobre Solos Não Saturados, p. 112–125, 1995.
- MARINHO, M. S.; COSTA, S. C. F. DO E.; ALMEIDA, H. C. **Desenvolvimento de aplicação web para classificação geotécnica de solos tropicais baseado na metodologia MCT**. Revista de Engenharia Civil IMED, v. 7, n. 1, p. 71, 16 nov. 2020.
- MATUELLA, M. F. **Avaliação dos efeitos do teor de umidade de compactação e variações de umedecimento e secagem na resistência ao cisalhamento de um solo argilo-siltoso** Salão UFRGS - SIC XXV Salão de Iniciação científica da UFRGS. Porto Alegre - RS, 2013.
- MELO, M. S. I. **Correção do teor de umidade em solos para terraplanagem com adição de cal viva e pó de pedra granítica**. Leiria, Portugal: Politécnico de Leiria, 2020.
- MENÉNDEZ, O. H. **Análise da influência de aspectos microestruturais no comportamento de solos derivados da cinza vulcânica**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2016.
- OLIVEIRA, G. M. DE. **Simetria de moléculas e cristais - Fundamentos da espectroscopia vibracional**. 1ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- PAIVA, M. C. ; SILVA, A. P. ; KUHN, V. O. ; MENENDEZ, O. H. **Caracterização de um Solo Arenoso Fino Laterítico para Base de Pavimentos**. Revista de Ciência e Tecnologia. RCT: REVISTA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, v. 5, p. 1-13, 2019.
- PASSO, D. P.; MARTINS, É. DE S.; GOMES, M. P.; REATTO, A.; CASTRO, K. B. DE; LIMA, L. A. DE S.; JUNIOR, O. A. C.; GOMES, R. A. T. **Caracterização Geomorfológica do Município de Barreiras, Oeste Baiano, Escala 1: 100.000**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, p. 1–31, 2010.
- PINTO, C. DE S. **Curso Básico Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3ª. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006.
- PINTO, C. DE S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.
- PINTO, J. M.; SILVA, C. L. DA; OLIVEIRA, C. A. DA S. **Influência De Variáveis Climáticas E Hidráulicas No Desempenho Da Irrigação De Um Pivô Central No Oeste Baiano 1**. Agronomia Brasileira, n. 1, p. 76–85, 2006.
- POPP, J. H. **Geologia Geral**. 7ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

- PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. 1ª. ed. Editora Nobel, 2017.
- QUEIROZ, R. C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil**. São Paulo: Editora Blucher, 2016.
- SANTOS, M. J. L.; TEXEIRA, C. M. DE L. **Importância Dos Métodos Analíticos De DRX E FRX Para Caracterização Das Argilas**. Revista FENEC, v. 1, n. 2, set. 2017.
- SANTOS, P. R. C. DOS. **Análise dos Solos**. 1ª. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda., 2014.
- SILVA, A. P.; MENENDEZ, O. H. . **Avaliação da Viabilidade Técnica de Solos Utilizados como Camada de Pavimentos**. RCT: REVISTA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, v. 7, p. 1-14, 2021.
- SILVA, T. A. **Avaliação da influência da sucção e do grau de intemperismo no coeficiente de empuxo lateral (K<sub>0</sub>) de solos residuais**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2017.
- SOARES, M. R. **Separação e caracterização da fração nanométrica dos minerais dos solos e sua importância na sorção de nutrientes e qualidade estrutural dos solos**. São Carlos - SP: Universidade de São Paulo, 2020.
- SOUZA, U. B.; SANTOS, P. S.; BRANDÃO, P. R. B. **Agronegócio e mudanças espaciais: Um estudo de caso do espaço barreirense**. Caminhos de Geografia, p. 95–109, 2015.
- STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. **Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 17, p. 1301–1309, 2013.
- STEIN, R. T.; FILHO, ANDRÉ L. D. P.; SILVEROL, A. C.; FREITAS, A. A. G. DE; DOMINONI, C. M. B.; SODER, M. N. F.; SILVA, T. J. L. DA S. **Estabilidade de taludes e contenções**. 1ª. ed. Porto Alegre: Editora SAGAH, 2021.
- WERK, S. M. S. DE. **Estudo Da Influência Dos Métodos De Compactação No Comportamento Resiliente De Solos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.
- WETZEL, R. S.; LEÃO, M. F.; SILVA, L. ALBUQUERQUE DA; AVALONE, M. C. K.; OLIVEIRA, R. F. G. DE; GONÇALVES, R. D.; GOYA, S. C. Y.; ALVES, T. C. **Mineralogia**. 1ª. ed. Porto Alegre: Editora SAGAH, 2020.