



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**  
**ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO RESILIENTE NÃO  
SATURADO DE TRÊS SOLOS TÍPICOS DE SUBLEITO DO  
RECÔNCAVO BAIANO**

**TALITA DA SILVA OLIVEIRA**

**CRUZ DAS ALMAS - BA**

**Dezembro de 2023**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**  
**ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO RESILIENTE NÃO  
SATURADO DE TRÊS SOLOS TÍPICOS DE SUBLEITO DO  
RECÔNCAVO BAIANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia como  
parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Civil.

Orientador: Professor Dr. Mario Sergio de Souza  
Almeida

**TALITA DA SILVA OLIVEIRA**

**CRUZ DAS ALMAS - BA**

**Dezembro de 2023**


TALITA DA SILVA OLIVEIRA

## AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO RESILIENTE NÃO SATURADO DE TRÊS SOLOS TÍPICOS DE SUBLEITO DO RECÔNCAVO BAIANO

Relatório final, apresentado a Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.


Cruz das Almas/BA, 22 de dezembro de 2023.

### BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 MARIO SERGIO DE SOUZA ALMEIDA  
Data: 07/01/2024 19:08:07-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Mario Sergio de Souza Almeida, DSc. (Orientador)  
DNIT/UFRB

Documento assinado digitalmente  
 MARIA DO SOCORRO COSTA SAO MATEUS  
Data: 24/12/2023 12:18:25-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof<sup>a</sup>. Maria do Socorro Costa São Mateus, DSc.  
PPGECEA/UEFS

Documento assinado digitalmente  
 WEINER GUSTAVO SILVA COSTA  
Data: 24/12/2023 00:45:37-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Weiner Gustavo Silva Costa, MSc.  
UFRB

## **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO RESILIENTE NÃO SATURADO DE TRÊS SOLOS TÍPICOS DE SUBLEITO DO RECÔNCAVO BAIANO**

### **EVALUATING THE UNSATURATED RESILIENT BEHAVIOR OF THREE TYPICAL SUBGRADE SOILS IN THE RECÔNCAVO**

**Talita da Silva Oliveira<sup>1</sup>**

**Mario Sergio de Souza Almeida<sup>2</sup>**

**RESUMO:** O comportamento mecânico do solo está diretamente relacionado aos parâmetros de deformação e resistência. Como forma de estudo, há o ensaio triaxial de módulo de resiliência que analisa tais parâmetros para um determinado material, seja ele saturado ou não. O módulo de resiliência, por vez, está relacionado com a sucção, que pode ser determinada pela sua curva característica de retenção de água, a partir de diferentes metodologias. Com isso, o objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento não saturado de três solos típicos do Recôncavo da Bahia, entre eles, um Latossolo Amarelo Distrocoeso, um vertissolo e um residual do granulito efetuando graus de saturação do solo acima, abaixo e na sua umidade ótima através de ensaios de módulo de resiliência. As amostras foram compactadas na energia Proctor Normal, em que foram moldados corpos de prova com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, feitos em triplicata para cada grau de saturação (30%, 50%, 70%, 95% e umidade ótima). Com os resultados médios obtidos no ensaio triaxial, foi possível notar que ao elevar o grau de saturação dos solos houve um decréscimo no módulo de resiliência e vice versa. Além disso, pode-se relacionar com a sucção que é diretamente proporcional ao módulo de resiliência. Portanto, pode-se concluir que os solos arenosos se encontram em uma condição mais favorável para pavimentação devido sua facilidade com a drenagem e sucção, além do seu alto valor no módulo de resiliência.

**PALAVRAS-CHAVE:** Comportamento mecânico. Módulo de resiliência. Grau de saturação.

**ABSTRACT:** The mechanical behavior of soil is directly related to deformation and strength parameters. As a study approach, there is the triaxial resilience modulus test that analyzes these parameters for a specific material, whether saturated or not. The resilience modulus, in turn, is related to suction, which can be determined by its characteristic water retention curve using different methodologies. Therefore, the objective of this study was to analyze the unsaturated behavior of three typical soils in the Recôncavo region of Bahia, including a Dystrocohesive Yellow Latosol, a vertisol, and a granulite residual, at different soil saturation levels above, below, and at their optimum moisture content through resilience modulus tests. The samples were compacted using the Standard Proctor energy, and test specimens with dimensions of 100 mm in diameter and 200 mm in height were

<sup>1</sup> Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Av. Rui Barbosa, 710, 44380-000, Cruz das Almas, Bahia, Brasil, talitaoliveira@aluno.ufrb.edu.br

<sup>2</sup> Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Av. Rui Barbosa, 710, 44380-000, Cruz das Almas, Bahia, Brasil, mario.almeida@ufrb.edu.br

formed, triplicated for each saturation level (30%, 50%, 70%, 95%, and optimum moisture). With the average results obtained from the triaxial test, it was observed that as the soil saturation level increased, there was a decrease in the resilience modulus and vice versa. Additionally, this can be correlated with suction, which is directly proportional to the resilience modulus. Therefore, it can be concluded that sandy soils are in a more favorable condition for pavement due to their ease of drainage and suction, in addition to their high resilience modulus values.

**KEY WORDS:** Mechanical behavior. Resilience module. Degree of saturation.

## 1. INTRODUÇÃO

A mecânica dos pavimentos funciona como um sistema de múltiplas camadas elásticas, cujo dimensionamento estrutural deve ser elaborado de forma que solicitações repetidas do tráfego comercial não resultem em falhas de curto prazo por fadiga do material. Cada camada é composta por um material e desempenha um papel na execução de uma função específica. O desempenho do pavimento depende das propriedades de tensão-deformação dos materiais em cada camada, da frequência e intensidade do tráfego e das condições ambientais e regionais (RODRIGUES, 1997).

Os pavimentos asfálticos apresentam comportamentos mecânicos e mecanismos de deterioração diferentes e a água desempenha um importante papel nessa deterioração. Alguns critérios de projetos são usados para garantir que a pavimentação seja projetada de forma que atenda aos requisitos de resistência e durabilidade, a partir das características dos materiais e das condições de tráfego (DAWSON, 2008).

O módulo de resiliência (MR) é um dos parâmetros relacionados ao comportamento mecânico de solos e materiais granulares, definido como uma relação entre a tensão desvio e a deformação resiliente (VIANA, 2007). Adicionalmente, Cunto (1998) destaca que o valor do módulo de resiliência pode variar com alterações no estado de tensões dos materiais.

Segundo os estudos de Dornelles *et al.* (2018), há uma diferença em valores de módulo de resiliência expressa possivelmente pela granulometria do material utilizado. Para solos arenosos, o módulo apresenta valores até duas vezes maiores que solos mais argilosos, para um mesmo teor de umidade e compactação. Os autores afirmam ainda, que os solos de comportamento laterítico apresentaram resultados maiores quando comparados com os solos não lateríticos da mesma formação. Na pesquisa de Rodrigues (1997) o aumento do módulo resulta no aumento da sucção.

Além disso, o módulo de resiliência é o parâmetro que caracteriza o comportamento elástico dos materiais sob carregamento cíclico. Esse parâmetro pode ser determinado em laboratório por meio de ensaios de carga cíclica. Em campo, o módulo de resiliência pode ser obtido a partir de retroanálise das medidas de deflexão (RODRIGUES, 1997). Mais precisamente, os ensaios em laboratório almejam repassar o que acontece em campo. As amostras são compactadas próximo a umidade ótima e em seguida alteram sua umidade (secando ou umedecendo), em campo esse fator é devido às condições climáticas da região em que se encontra (GONÇALVES, 1999).

De acordo Farias (2004), o solo não saturado é um solo multifásico com grau de saturação inferior a 100%. Por conta disso, é de suma importância estudos específicos como forma de prever o comportamento do solo em circunstâncias distintas da saturação total ou daquela relativa às condições ótimas de compactação, para posterior análise de seu comportamento por meio do módulo de resiliência (MR). Yao *et al.* (2018) mencionam que o módulo de resiliência dos solos do subleito precisa ser verificado a partir de vários testes usando o sistema triaxial. Além disso, os autores relatam ainda, a partir dos resultados de seus estudos, que o MR aumenta gradativamente com o aumento da sucção matricial.

A sucção a que os solos estão submetidos pode ser determinada pela sua curva característica de retenção de água. Esta curva de retenção pode ser determinada por diferentes metodologias, dentre elas a que utiliza um método do papel filtro (ASTM D5298-03). Esse método consiste em provocar a transferência de água do solo para o papel até que o equilíbrio seja atingido, através das igualdades de sucções entre o solo e o papel filtro, impedindo novas transferências de fluidos entre os materiais. Além disso, nesse método, é possível medir sucções entre 400 e 30000 kPa, em que a medida pode ser de duas formas: com contato do papel filtro e do solo (sucção matricial) e sem contato (sucção total) (SOUZA *et al.*, 2020). Os autores mostram em sua pesquisa a relação entre energia de compactação e umidade volumétrica, onde para energias maiores resultam na diminuição da umidade e tamanho dos poros, levando a curva de retenção a elevados valores de sucção. Em outro estudo de mesma autoria, são apresentados resultados da relação entre a sucção total estudada e a resistência a compressão. Os resultados mostraram que o aumento da resistência equivale a menores valores de sucção (SOUZA, 2022).

De acordo com Li e Seling (1994), um dos fatores que podem afetar o comportamento resiliente dos solos é a densidade e umidade de compactação. Segundo esses autores, o estado físico do solo pode ser alterado pelo efeito do ambiente e pelo efeito

da compactação causada pelo tráfego. O teor de umidade e a densidade seca podem variar com o tempo de diferentes formas. Isso pode levar a uma alteração significativa do módulo de resiliência. A consideração do efeito da variação do teor de umidade no módulo resiliente deve ser acompanhada de informações sobre a variação da densidade seca.

Tang *et al.* (2020) apresentaram resultados semelhantes em seus estudos com um solo argiloso onde comprovaram que a rigidez da amostra aumenta à medida que a água evapora, ou seja, o teor de água diminui. Além disso, mostram em seus resultados que a resistência à compressão não confinada (UCS) também aumenta com a diminuição do teor de água, sendo quase duas vezes maior para um teor 4% menor. Por exemplo, a UCS com um teor de 25% de água apresentou 373,6 kPa e obtém um aumento para 536,9 kPa com um teor de 21%, sendo assim, a taxa de aumento é de 40,8 kPa aproximadamente por unidade de diminuição no teor de água.

Na pesquisa de Yao *et al.* (2018) foram realizados ensaios comparativos com variação dos teores de água e verificou-se que o módulo de resiliência das amostras estudadas diminuiu com o aumento do estresse deformador (tensão desvio). Além disso, os resultados mostraram que o módulo aumentou com o aumento do estresse volumétrico (pressão de confinamento), para o mesmo teor de água.

No estudo com grãos de feijão de Resende *et al.* (2007), constatou-se uma relação inversa entre a quantidade de água e a resistência a compressão, onde o aumento do teor de umidade resultou em uma menor resistência à compressão. Os autores também destacam que observaram, em estudos prévios, que a deformação causada no ensaio de compressão depende do teor de umidade. Isso se deve ao fato das tensões cisalhantes presentes nos tecidos internos dos grãos que, dependendo da direção do esforço aplicado, requer uma força diferenciada para deformar os grãos, afirma os autores.

Em relação ao módulo de cisalhamento, Ng *et al.* (2017) afirmam que para solos não saturados o módulo é baixo quando apresenta baixa sucção e relação de vazios. Ademais, seus resultados mostraram que o módulo de cisalhamento aumenta à medida que a sucção também aumenta.

Ainda sobre o teor de umidade e suas variações, na pesquisa de Gonçalves (1999), foi realizada a análise comparativa dos módulos de resiliência na umidade ótima (19,5%), amostra seca com 2% abaixo (17,5%) e amostra úmida com 1% acima (20,5%), verificando-se uma diminuição de módulo de resiliência para as amostras úmidas e um aumento para as

amostras mais secas, em comparação com os resultados dos ensaios realizados na umidade ótima do solo estudado. Thadkamalla e George (1995), Bernucci (1997), Drumm *et al.* (1997) e Rodrigues (1997) mostraram comportamentos semelhantes a este estudo, comprovando assim, a coerência dos resultados encontrados.

De acordo com Yang, Huang e Tai (2005), tanto o teor de umidade quanto a compactação do solo desempenham papéis cruciais e têm influência nas variações do módulo de resiliência. Além disso, uma compactação inadequada pode levar a uma redução no módulo de resiliência do solo. Os autores também observaram uma diminuição significativa no módulo de resiliência do solo quando ocorre aumento do teor de umidade. Esses resultados destacam a importância de considerar cuidadosamente o teor de umidade e realizar uma compactação adequada para garantir o desempenho desejado do solo em termos de módulo de resiliência. Da mesma forma, Ng *et al.* (2013) concluíram em seu trabalho que o módulo de resiliência é maior com a secagem em comparação ao umedecimento (cerca de 10%), possivelmente por consequência de efeitos de sobreconsolidação induzidos.

A grande influência do grau de saturação do solo sobre a variação do módulo de resiliência, sobretudo de solos finos, já é de conhecimento amplo. Entretanto, compreender como esta variação se dá em solos específicos é de suma importância para os estudos relacionados à infraestrutura de transportes, especificamente no Estado da Bahia, onde há carência de trabalhos relacionados aos estudos do comportamento de solos finos não saturados em pavimentação.

Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento mecânico não saturado de três solos do Recôncavo baiano: um Latossolo Amarelo Distrocoeso, um Vertissolo conhecido como Massapê e um residual do gnaisse/granulito chamado de Regolito, por meio de ensaios de módulo de resiliência, realizados em amostras compactadas em seus respectivos teores ótimos de umidade e diferentes graus de saturação.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

No presente estudo foram utilizadas três amostras de solos típicos da região do Recôncavo do estado da Bahia, Brasil, sendo estes: (a) Latossolo Amarelo Distrocoeso (LAD), coletado na área interna da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), localizada na cidade de Cruz das Almas (Figura 1a); (b) Vertissolo (VTS) (Figura 1c), e;



(c) residual do granulito, conhecido como Regolito (REG) (Figura 1b). Amostras deformadas de cada solo foram coletadas, transportadas para o Laboratório e secadas ao ar. A exceção foi o VTS que, em função de sua elevada umidade e textura, foi seco em estufa até a constância de massa, a temperatura de 60 °C.



**Figura 1:** Amostras dos solos estudados: (a) LAD, (b) REG e (c) Umedecimento do VTS.

## 2.1 Ensaios de caracterização dos solos

Os solos foram caracterizados para determinação da granulometria, densidade real ( $\rho_s$ ), limite de liquidez ( $w_L$ ), limite de plasticidade ( $w_P$ ) e índice de plasticidade (IP). Estes ensaios foram realizados seguindo as seguintes normas específicas: DNER 051/94-ME (DNER, 1994b), DNER 093/94-ME (DNER, 1994d), DNER 122/94-ME (DNER, 1994e), DNER 082/94-ME (DNER, 1994c), nesta ordem.

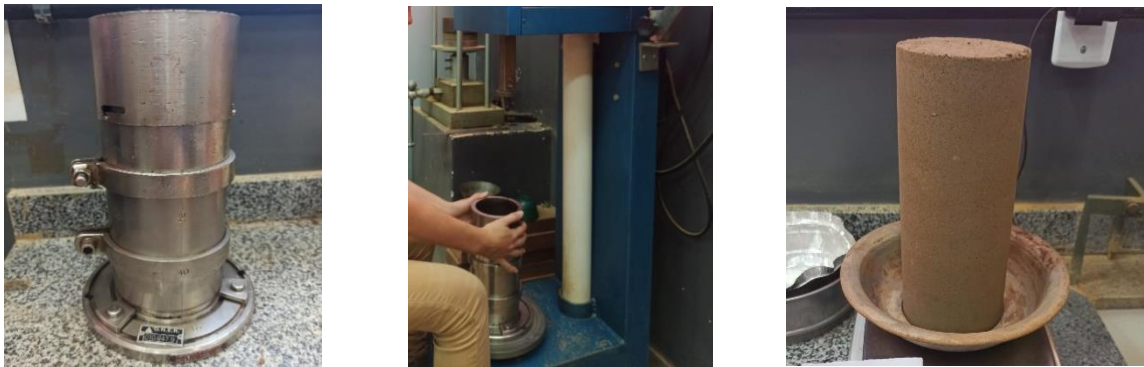
Além dos ensaios citados, foram realizados os ensaios de compactação mini-MCV, conforme o método de ensaio DNIT 258 (DNIT, 2023), e Perda de Massa por Imersão (PMI), de acordo com o método de ensaio DNIT 258 (DNIT, 2023), ambos para proporcionar a classificação de cada solo pela metodologia MCT, com base no procedimento DNIT 258 (DNIT, 2023).

## 2.2 Compactação e moldagem de corpos de prova

Após todos os ensaios de caracterização, foi iniciada a compactação do solo para determinação da curva de compactação e dos parâmetros ótimos de compactação: umidade ótima ( $w_{ót}$ ) e massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{dmáx}$ ) dos solos estudados. Para a compactação, o solo seco foi destorroado na peneira #10, quarteado (obtendo

amostras homogêneas) e foi determinada sua umidade higroscópica, de acordo com os procedimentos descritos na norma DNER 041/94-ME (DNER, 1994a). A partir daí, separou-se 4000 g para umedecê-lo até uma possível umidade ótima ou próxima dela, além de dois teores acima e dois teores de umidade abaixo da ótima, totalizando cinco corpos de prova e levar à câmara úmida, por no mínimo 12 horas. Compactou-se os corpos de prova (CP) com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, em 10 camadas, aplicando 5 golpes por camada, na energia de Proctor Normal, visto que, de acordo com experimentos anteriores, não houve diferenças nos resultados. Com isso, obteve-se a curva de compactação dos solos e suas umidades ótimas.

Definidos os parâmetros ótimos, iniciou-se a preparação das amostras utilizando o procedimento descrito acima. Todas as amostras foram compactadas em moldes tripartidos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura (Figura 2a), na energia de Proctor Normal, em 10 camadas com 5 golpes por camada. A compactação foi realizada com auxílio de compactador automático (Figura 2b).



**Figura 2:** Compactação das amostras de solo LAD: (a) Molde do CP, (b) Compactação do CP e (c) CP compactado.

Os procedimentos descritos foram repetidos para todos os solos estudados na pesquisa.

### 2.3 Saturação do solo

Para avaliação da influência da saturação do solo no módulo de resiliência, promoveu-se a secagem e umedecimento de corpos de prova moldados nos parâmetros ótimos de compactação. Para isso, foi necessário a utilização dos índices físicos (Equação 1) para determinar o grau de saturação ( $S_r$ ) dos solos estudados na respectiva pesquisa, referente a  $w_{ót}$ .

$$Sr = \frac{\rho_s \cdot W}{e \cdot \rho_w} \quad (1)$$

em que

$e$ : Índice de vazios;

$\rho_w$ : Massa específica da água [g/cm<sup>3</sup>];

$\rho_s$ : Densidade real;

Segundo Ng *et al.* (2013) em outros estudos, amostras de solo foram compactadas em diferentes teores de água, mas esta abordagem tem certas limitações. Primeiro, as amostras compactadas com a mesma densidade seca, mas com teores iniciais de água diferentes, não podem ser consideradas “idênticas”. Alguns pesquisadores relataram que diferentes teores de água de compactação podem induzir diferentes estruturas inerentes ao solo. Nesse sentido é que se propôs a metodologia usada nesse trabalho, além do fato de que essa metodologia também simula possível secagem e umedecimento do solo no campo.

Com o grau de saturação determinado, foram estudados outros graus de saturação para o solo (acima e abaixo da umidade ótima), feitos em triplicata. A partir dos índices físicos, foi possível determinar a massa (Equação 2) que o CP deveria chegar para atingir a saturação preestabelecida, após secagem ou umedecimento. Essa faixa de valores foi proposta para avaliar o comportamento para além dos valores possíveis de ocorrência em campo.

$$M = Ms * \left(1 + \left(\frac{Sr * e}{\rho_s}\right)\right) \quad (2)$$

em que

$Ms$ : Massa seca [g];

$M$ : Massa [g];

Os CP foram colocados sobre a parte superior externa de uma estufa a 60 °C para secagem (Figura 3a), averiguando sempre a sua massa. Os CP de saturação acima da umidade ótima (95%) foram envoltos em papel toalha para dificultar a perda de massa e umedecidos por meio de um conta gotas até atingir a massa almejada (Figura 3b). Ao atingi-la, todos os CP foram medidos com auxílio de um paquímetro para determinação do seu novo volume e levados novamente para a câmara úmida, por no mínimo 12 horas, para uniformização da umidade.



**Figura 3:** Preparação das amostras com diferentes graus de saturação. (a) Corpos de prova na secagem da estufa e (b) Corpo de prova em processo de umedecimento.

#### 2.4 Ensaio de módulo de resiliência

Foram realizados ensaios de módulo de resiliência (MR) em amostras dos solos LAD, REG e VTS utilizando a prensa triaxial, sendo o modelo de ensaio utilizado para MR, o modelo composto (Equação 3).

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (3)$$

em que

$k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ : constantes;

$\sigma_3$ : Tensão desviadora [MPa];

$\sigma_d$ : Tensão desviadora [MPa];

O ensaio foi feito aplicando 18 pares de tensões (completo), conforme especifica a norma DNIT 134/18-ME (DNIT, 2018). Nos ensaios completos (18 pares de tensão) onde o material rompeu e não foi possível concluir, foi feito um novo ensaio aplicando 12 pares de tensões para materiais de subleito (ensaio simples). As tensões aplicadas em cada ensaio estão apresentadas abaixo nas tabelas 1 e 2.

Após o ensaio, os CP foram levados à estufa a 105 °C, durante 48 horas para determinação da massa seca e cálculo de umidade final.

**Tabela 1:** Tensões para determinação do módulo de resiliência com 18 pares (DNIT, 2018).

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	$\sigma_1/\sigma_3$
0,020	0,020	2
	0,040	3
	0,060	4
0,035	0,035	2
	0,070	3
	0,105	4
0,050	0,050	2
	0,100	3
	0,150	4
0,070	0,070	2
	0,140	3
	0,210	4
0,105	0,105	2
	0,210	3
	0,315	4
0,140	0,140	2
	0,280	3
	0,420	4

**Tabela 2:** Tensões para determinação do módulo de resiliência com 12 pares (DNIT, 2018).

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	$\sigma_1/\sigma_3$
0,020	0,020	2
	0,040	3
	0,060	4
0,035	0,035	2
	0,070	3
	0,105	4
0,050	0,050	2
	0,100	3
	0,150	4
0,070	0,070	2
	0,140	3
	0,210	4

## 2.5 Curvas de retenção de água no solo

Souza *et al.* (2020) em seu trabalho para obtenção de curvas de retenção de água no solo utilizou o método do papel filtro. Inicialmente, as amostras compactadas foram reduzidas de tamanho, o CP de 100 mm de altura se transformou em 30 mm, como mostra a Figura abaixo. A partir da técnica do papel filtro utilizada, foi possível medir a sucção entre 400 e 30000 kPa, nesse caso há dois métodos de medição: sem contato do papel com o solo (sucção total) ou com contato (sucção matricial). No trabalho realizado pelos autores foi medido a sucção total.



**Figura 4:** Corpos de prova para o ensaio da curva de retenção (Adaptado de Souza *et al.*, 2020).

O papel filtro utilizado foi o de Whatman's 42. Após a compactação, colocou-se em um recipiente uma amostra de solo com uma determinada umidade (umidade na qual se deseja obter o valor da sucção) e um papel filtro devidamente calibrado, acima da amostra de solo. O princípio do método consiste em provocar a transferência de água do solo para o papel filtro até que o equilíbrio seja atingido. Esse equilíbrio é atingido pela igualdade de sucções entre o solo e o papel filtro, o que impede que haja novas transferências de fluidos entre os materiais (SOUZA *et al.*, 2020).

Ao fim do período de equilíbrio, que durou 30 dias, realizaram-se as medidas de massa do papel filtro de cada montagem, para determinação do teor de umidade. Ao término do ensaio, após a manipulação dos papéis filtro, as amostras de solo foram secas em estufa a 105 °C, por 24 h, e tiveram suas massas aferidas, para determinação da umidade volumétrica destas. Com a determinação desta umidade final do solo, tem-se um par (umidade x sucção) da curva de retenção. Repetiu-se esse experimento para amostras de solo com diferentes teores de umidade, sendo possível obter os pontos da curva de retenção de umidade do solo (SOUZA *et al.*, 2020).

Com a curva de retenção definida, aplicou-se a equação proposta por Fredlund & Xing (1994), para obtenção dos resultados que permitiram determinar, com muito boa acurácia, o valor da sucção do solo em função de diferentes valores de umidade volumétrica. A equação proposta por Fredlund & Xing (1994) é apresentada na Equação 4:

$$\theta = \theta_{\text{sat}} \left[ 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\Psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \right] \frac{1}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\Psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (4)$$

em que

$\theta$ : Teor de umidade volumétrica a uma dada sucção;

$\Psi_r$ : Sucção residual;

$\theta_{sat}$  : Teor de umidade volumétrica de saturação;

$\Psi$  : Sucção para qual se deseja obter a umidade;

a,m,n: Parâmetros de ajuste da Equação.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização do solo

Os valores de  $w_L$ ,  $w_P$ ,  $IP$  e densidade real obtidos dos ensaios de caracterização realizados, estão apresentados na Tabela 3.

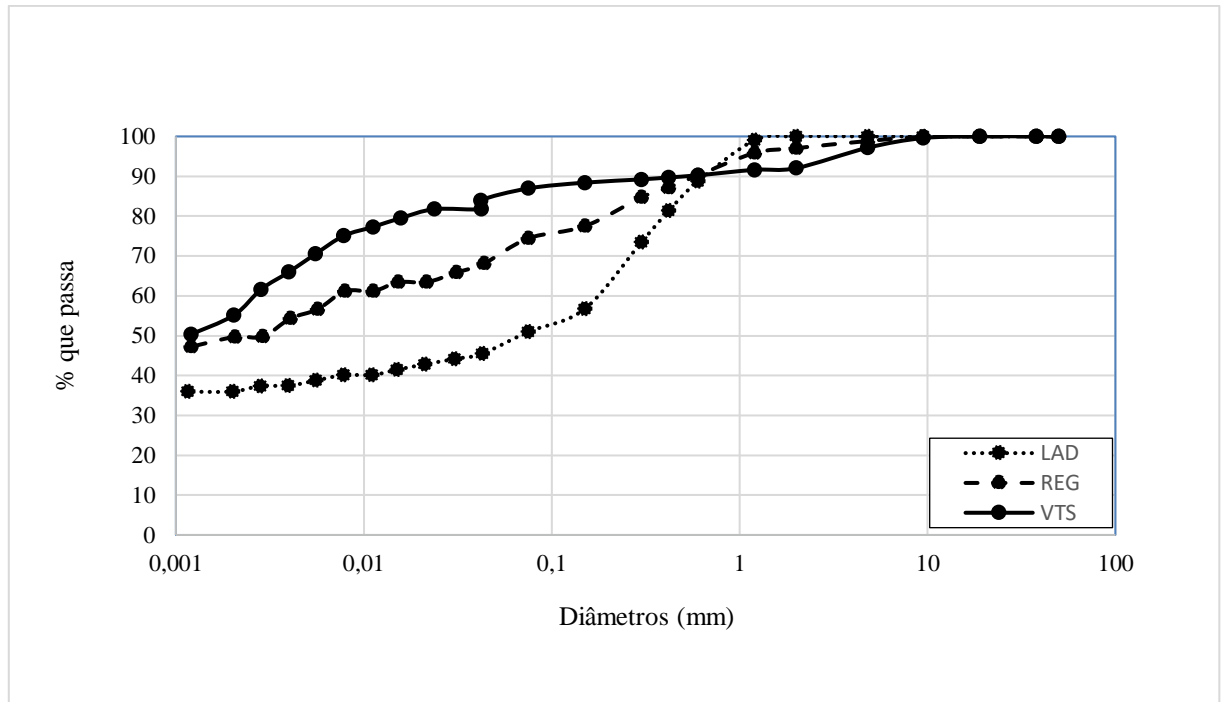
**Tabela 3:** Caracterização dos solos.

<i>Solo</i>	$w_l$ (%)	$w_p$ (%)	$IP$ (%)	$\rho_s$
LAD	27	19	8	2,660
REG	62	51	11	2,710
VTS	68	32	36	2,610

Nota-se que o REG e VTS apresentam limite de liquidez bem próximos, apesar de suas diferenças granulométricas. Para tanto o solo LAD apresentou resultados similares ao VTS quanto a sua densidade real, mostrando que cada solo estudado possui suas similaridades e particularidades entre si, podendo ser justificado pela alta porcentagem de silte no VTS.

Já o REG apresentou características plásticas, sendo argilas de baixa compressibilidade, segundo Santo (2022) mostra em seus resultados. Por fim, o vertissolo se mostrou predominantemente fino com uma fração pequena de areia (MIRANDA, 2006).

Na Figura 5 é apresentada a curva granulométrica dos solos estudados. O solo LAD apresentou 36,9% de argila, 12,6% de silte e 50,5% de areia, o REG 49,1% de argila, 23,5% de silte, 31,8% de areia e 2,9% de pedregulho e o VTS apresentou 54,6% de argila, 31,2% de silte, 9,9% de areia e 8,0% de pedregulho. Dessa forma, o VTS é o solo mais argiloso dentre os estudados.



**Figura 5:** Curva granulométrica dos solos estudados.

Para os ensaios de MCT realizados com os solos em estudo, foi verificado que o solo LAD é classificado como laterítico arenoso (LA'), enquanto o REG classificado como Laterítico argiloso (LG') e o VTS como Não laterítico argiloso (NG'), de acordo com os dados Tabela 4.

**Tabela 4:** Classificação MCT dos solos.

SOLO	Índices classificatórios			Classificação MCT
	$c'$	$d'$	$P_i$ (%)	
LAD	1,23	98,6	55	LA'
REG	2,23	31,1	43	LG'
VTS	2,10	13,4	180	NG'

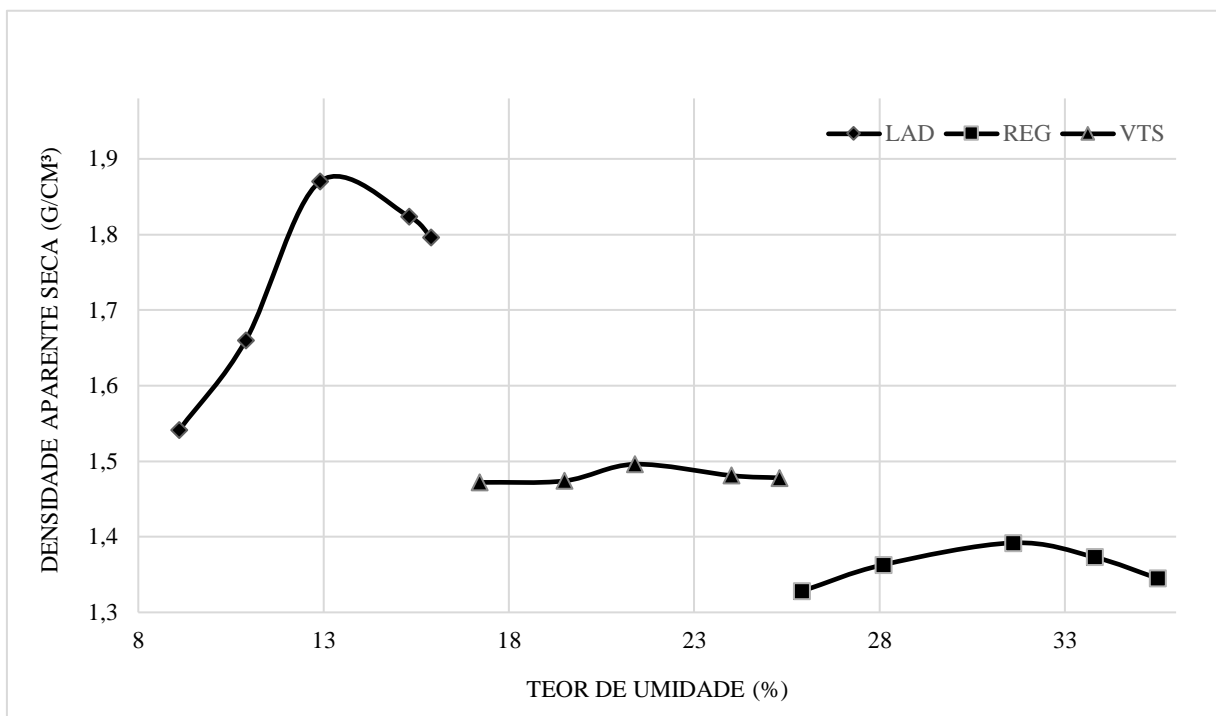
Segundo Malaquias *et al.* (2020), que utilizou o mesmo solo (LAD) em estudos prévios, o LAD possui baixa saturação por bases e baixa capacidade de troca de cátions, o que leva a ter uma baixa atividade da fração argila. Ainda segundo os autores, o solo apresenta mineralogia caulinítica, granulometria fina, é classificado, de acordo com a metodologia da TRB (*Transportation Research Board*), da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), como A-4, solo siltoso moderadamente plástico e LG' (Laterítico Argiloso) de acordo com a classificação MCT (Miniatura Compacto Tropical), o que contradiz os resultados obtidos neste trabalho, fato que pode estar associado a variabilidade na amostragem do material. Na pesquisa de Souza



*et al.* (2020), o REG apresentou classificação TRB A 7-5 e o VTS A 7-6 e predomínio de argilominerais ativos.

### 3.2 Compactação e moldagem de corpos de prova

Os dados da curva de compactação obtidos estão apresentados na Figura 6 abaixo e mostrados na Tabela 4.



**Figura 6:** Curvas de compactação dos solos.

A partir da Figura acima é possível observar os valores de massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{dmáx}$ ) e umidade ótima ( $w_{ót}$ ), como mostra a Tabela 4 abaixo.

**Tabela 4:** Parâmetros ótimos de compactação dos solos.

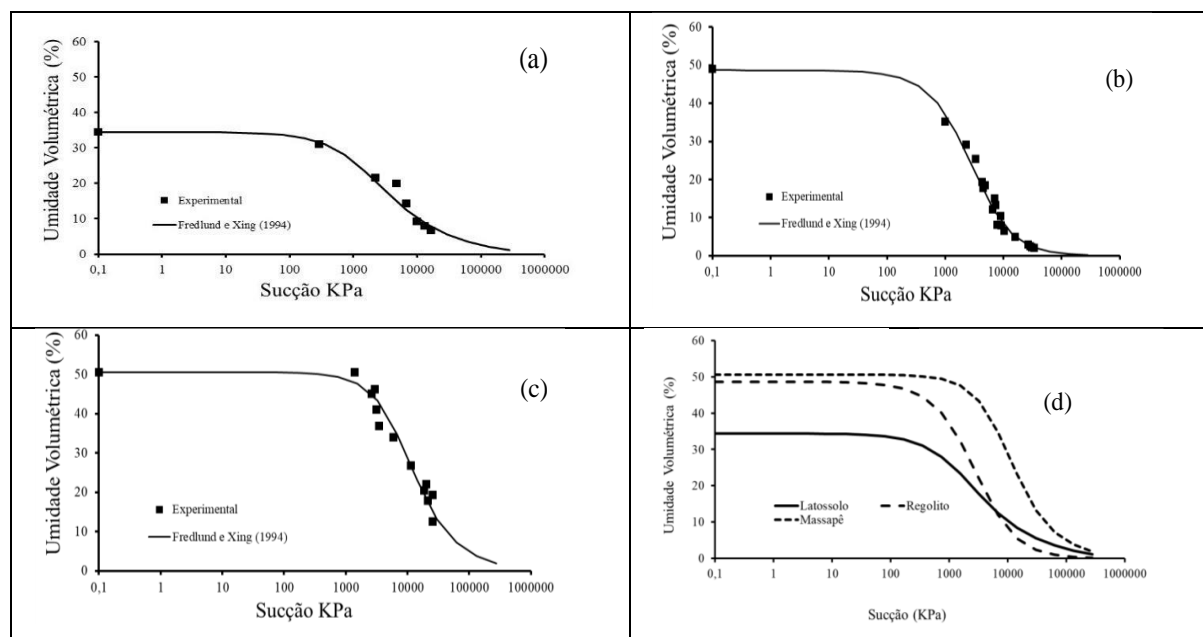
Solo	$\rho_{dmáx}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$w_{ót}$ (%)
LAD	1,889	13,64
REG	1,392	31,27
VTS	1,497	21,84

A partir do Gráfico e da Tabela apresentados, percebe-se que os resultados dos valores ótimos são maiores para os solos de granulometria argilosa, em relação a mesma energia de compactação. Esse fator também foi encontrado por Souza *et al.* (2020) para um mesmo solo, modificando apenas a energia de compactação utilizada e também por Sant'Anna

(2003). Além disso, o LAD que foi caracterizado como um solo arenoso, apresenta a maior massa específica e a menor wót, enquanto o REG e VTS caracterizados como argilosos apresentam as menores massa específica seca e as maiores wót, mostrando que quanto maior for a wót do solo, menor será sua massa aparente seca e mais argiloso será o solo.

### 3.3 Curvas de retenção de água no solo

Em seu trabalho utilizando o método do papel filtro sem contato com o solo, Souza *et al.* (2020) encontrou os resultados seguintes, mostrados na Figura 7 abaixo.



**Figura 7:** Curva de retenção de água no solo com ajuste de de Fredlund & Xing (1994), sendo: a) LAD, b) REG, c) VTS e d) Comparativo (Adaptado de Souza *et al.*, 2020).

A técnica do papel filtro baseia-se em colocar um solo úmido em contato com um material poroso. A água do solo é transferida para o material por capilaridade, até o equilíbrio ser atingido em um determinado intervalo de tempo. Ao entrar em equilíbrio, as sucções no solo e no material igualam-se, apesar de suas respectivas umidades serem diferentes. Assim, determina-se a relação sucção *versus* umidade, através da curva de calibração do material e também a sucção do solo (CHRYSTELLO, 2017).

A seguir, a Tabela 5 mostra os valores de ajustes utilizados da curva de retenção de água para os solos em estudo.

**Tabela 5:** Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água através do método de Fredlund & Xing (1994) (Adaptado de Souza *et al.*, 2020).

<i>Solo</i>	$\theta_{\text{sat}}$ (%)	$\Psi_r$ (kPa)	<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	$R^2$
LAD	34,38	20.000	1500	1,32	1,05	0,93
REG	45,92	30.000	3350	2,90	1,10	0,97
VTS	49,94	15.000	10.000	2,54	0,75	0,94

É possível notar, de acordo a Figura 7, que as curvas de retenção dos solos REG e VTS apresentam valores de umidade volumétrica maiores e semelhantes entre si, em comparação ao solo LAD. No entanto, relacionando umidade volumétrica *versus* sucção, o VTS mostra na Figura 7d que possui os resultados mais elevados, ocasionados pelas suas características granulométricas, maior teor de argila em sua composição e expansividade.

A dessaturação é indicada pelo ponto em que a parte horizontal da curva começa a inclinar, indicando a entrada de ar nos poros maiores e também constitui um fator para análise nas curvas de retenção, juntamente com o valor de entrada de ar. O início do estágio de dessaturação mostra que valores de sucção elevados geram pequenas variações no teor de umidade do solo que, desta forma, dificulta a remoção de água do solo (SOUZA, 2022). De acordo a autora, os solos argilosos tendem a aumentar a retenção de água e dificultar a drenagem, o que é justificado pela Figura 7d pelos altos valores de sucção do VTS.

A partir da Figura 7, é possível perceber os diferentes intervalos de sucções que cada solo possui. O LAD apresenta intervalos entre 500 e 15000 kPa em média, enquanto o REG e VTS está entre 1000 e 30000 kPa em média. Esse fator mostra que os solos argilosos apresentam sucções maiores quando comparados a solos arenosos.

### 3.4 Módulo de resiliência

Na Tabela 6 estão dispostos os resultados médios de MR dos solos ensaiados na prensa triaxial da marca OWNTEC, além das constantes de regressão  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  que foram determinadas a partir dos resultados experimentais de MR realizados para o ensaio com os 12 e 18 pares de tensões estabelecidos pela norma DNIT 134/2018-ME. Os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do conjunto de ensaios também estão demonstrados na Tabela.

Nota-se que, há uma particularidade nos solos, em relação aos valores de MR e grau de saturação apresentados acima: para saturações mais baixas, o MR cresce consideravelmente, enquanto para graus de saturação acima da  $w_{\text{ót}}$ , o MR decresce da mesma maneira. Isso ocorre por conta do solo estar mais seco, e por isso, mais rígido. Além

disso, percebe-se uma similaridade nos solos VTS e LAD quando se trata do comportamento desses fatores citados, apesar dos solos possuírem características granulométricas distintas.

**Tabela 6:** Valores médios de MR e constantes de ajuste do modelo composto.

<i>Amostra</i>	<i>Saturação</i>	<i>MR médio (MPa)</i>	<i>k<sub>1</sub></i>	<i>k<sub>2</sub></i>	<i>k<sub>3</sub></i>	<i>R<sup>2</sup></i>
LAD	30,01%	644,94	8345,30	0,75	0,10	0,98
	48,87%	623,97	8762,13	0,71	0,18	0,99
	69,93%	665,53	5875,05	0,60	0,13	0,97
	88,89%	203,93	496,88	0,40	-0,11	0,90
	94,79%	88,10	227,96	0,42	0,19	0,11
REG	29,29%	332,03	1913,09	0,58	0,08	0,98
	46,95%	320,13	1300,12	0,44	0,09	0,99
	70,01%	215,45	920,57	0,42	0,14	0,98
	89,50%	100,82	62,04	0,10	-0,34	0,82
	95,04%	36,91	227,96	0,42	-0,19	0,10
VTS	30,00%	197,39	1261,12	0,58	0,14	0,96
	57,83%	181,23	710,53	0,42	0,10	0,95
	70,21%	189,41	632,41	0,38	0,07	0,96
	76,67%	96,32	50,80	0,04	-0,33	0,85
	84,82%	46,49	40,69	0,04	-0,36	0,76

Os valores médios para os graus de saturação abaixo da umidade ótima se estabilizaram em torno de 70% para os solos LAD e VTS. O REG apresentou um aumento gradativo em relação ao seu teor de umidade ótima, se estabilizando apenas a partir da saturação de 50%.

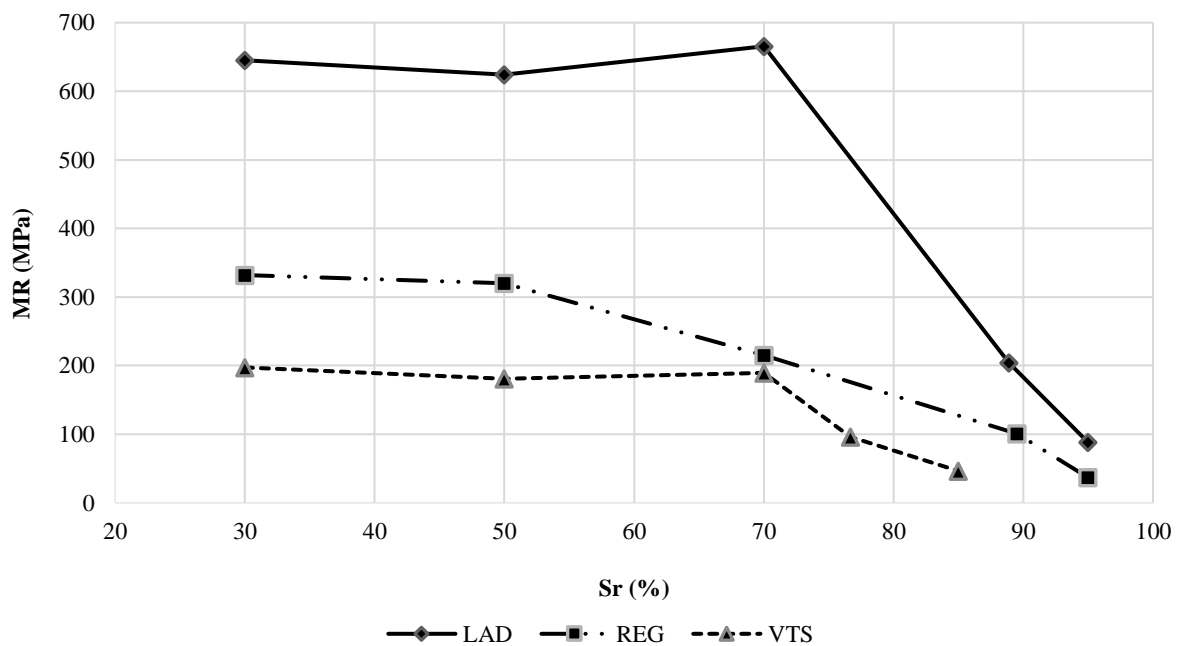
Para a saturação de 95%, os CP de todos os solos atingiram seu limite de deformação permanente acumulado previsto em norma quando ensaiados com 18 pares de tensão. Por conta disso, foi realizado o ensaio simples com 12 pares de tensão. Ainda assim os CP ensaiados para esse grau de saturação só suportaram 11 pares de tensão. Logo, para esse grau de saturação, os valores apresentados nas Tabelas acima são referentes aos resultados para esses pares de tensão.

Vale salientar que para o solo VTS, os CP de saturação 95% desagregaram por conta da alta umidade em que foram submetidos (Figura 8). Por conta disso, foi realizada uma análise para as saturações de 85% e 90%, até encontrar uma saturação acima da umidade ótima em que o solo apresentasse resultados para o MR, encontrando, assim, por volta de 85%.



**Figura 8:** Corpo de prova desagregado na saturação 95%.

Na Figura 9 consta um resumo dos diferentes graus de saturação e seus respectivos MR, sendo possível verificar os altos valores em graus abaixo da umidade ótima e valores menores quando o solo está mais umedecido.



**Figura 9:** Resultados de módulo de resiliência para os solos.

Rosa (2021), encontrou em seu estudo que há um decréscimo dos valores médios de MR apresentados pelos solos estudados, em função do aumento de umidade, comprovando os resultados apresentados acima. Em consonância com o autor, os resultados de MR dos

estudos de Preussler (1978), Yang, Huang e Tai (2005) e Ng *et al.* (2013) apresentaram a mesma tendência a uma redução com o aumento do grau de saturação.

A partir da Figura acima, nota-se, de maneira mais clara a constância de resultados de MR para os solos LAD e VTS nas saturações abaixo da umidade ótima, bem como o aumento gradativo do solo REG a partir da saturação do solo. É possível perceber também a discrepância nos valores de MR obtidos no ensaio comparando-se os solos arenosos e argilosos, para umidades abaixo da ótima. Esse fato pode ser explicado por suas características granulométricas, como teor de areia e argila em suas composições, o que leva a outros fatores como retenção de água e drenagem do solo.

Ao relacionar as Figuras 7 e 9, confere-se que ao diminuir a umidade, a saturação também diminui e os valores de MR e sucção aumentam, para todos os solos. Com isso, há uma perda percentual na rigidez ao se elevar o grau de saturação de cada solo em estudo. Mais precisamente, o VTS apresentou os maiores valores de sucção em comparação aos solos LAD e REG, conforme Figura 7d e os menores valores de MR, que pode ser justificado por apresentar em sua composição grande quantidade de argila. Na pesquisa de Souza (2022), é apresentado os resultados da relação entre a sucção total estudada e a resistência a compressão, que mostram que o aumento do MR equivale a menores valores de sucção.

### **3.5 Relação entre MR, Sucção, Teor de umidade e Grau de saturação**

Na Tabela 7 são apresentadas as variáveis utilizadas para determinação da relação entre o módulo de resiliência (MR) e a sucção ( $\psi_m$ ) de cada corpo de prova ensaiado na condição não saturada, calculada com auxílio da Equação 4 e das constantes de ajuste determinadas por Souza *et al.* (2020), sendo estas a massa específica aparente seca ( $\rho_d$ ), teor de umidade ( $w$ ), porosidade ( $n$ ), grau de saturação ( $S_r$ ) e teor de umidade volumétrico ( $\theta$ ).

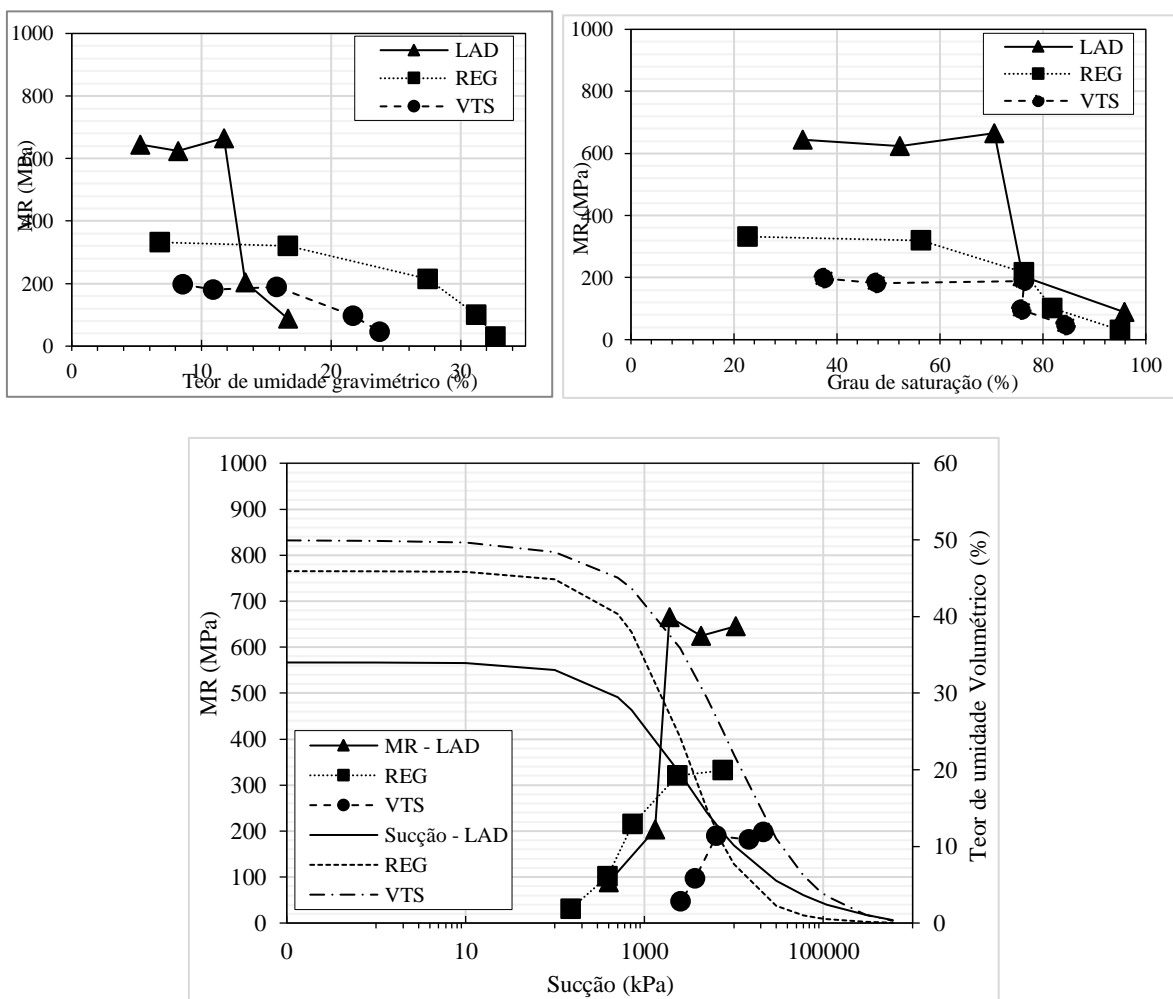
Comparando os valores de porosidade ( $n$ ) e umidade volumétrica ( $\theta$ ), infere-se que a medida que a umidade aumenta com a saturação, a porosidade se mantém constante, para todos os solos da Tabela acima.

**Tabela 7:** Relação entre MR, sucção, teor de umidade e grau de saturação.

<i>Amostra</i>	CP	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	<i>w</i> (%)	<i>n</i>	<i>Sr</i> (%)	$\theta$ (%)	$\psi_m$ (kPa)	<i>MR</i> (MPa)
LAD	CP 01	1,865	5,02	0,30	31,37	9,37	11524,55	654,80
	CP 02	1,874	5,33	0,30	33,76	9,98	10254,14	635,09
	CP 03	1,878	5,46	0,29	34,90	10,26	9739,84	644,94
	CP 04	1,836	8,36	0,31	49,55	15,46	4303,11	602,73
	CP 05	1,886	8,18	0,29	52,96	15,42	4331,50	645,22
	CP 06	1,903	8,11	0,28	54,27	15,44	4317,71	623,97
	CP 07	1,874	11,68	0,30	74,04	21,89	1822,26	605,16
	CP 08	1,802	12,73	0,32	71,15	22,94	1575,60	725,90
	CP 09	1,860	10,75	0,30	66,50	20,00	2346,41	665,53
	CP 10	1,832	13,56	0,31	79,85	24,85	1192,85	224,16
	CP 11	1,790	13,21	0,33	72,33	23,65	1425,02	186,15
	CP 12	1,811	13,37	0,32	75,92	24,22	1311,04	201,47
	CP 13	1,817	16,48	0,32	94,51	29,95	438,00	101,43
	CP 14	1,817	16,56	0,32	94,98	30,10	420,50	74,99
	CP 15	1,824	16,93	0,31	98,23	30,88	330,00	88,10
REG	CP 01	1,514	6,55	0,44	22,47	9,92	7779,96	369,64
	CP 02	1,495	6,94	0,45	23,15	10,38	7431,88	316,03
	CP 03	1,484	6,88	0,45	22,56	10,21	7558,09	310,43
	CP 04	1,506	16,07	0,44	54,46	24,20	2510,62	327,00
	CP 05	1,512	16,37	0,44	55,96	24,74	2412,75	324,42
	CP 06	1,497	17,54	0,45	58,63	26,25	2158,38	308,95
	CP 07	1,369	27,71	0,49	76,67	37,93	720,09	181,96
	CP 08	1,390	26,94	0,49	76,90	37,45	766,90	169,50
	CP 09	1,359	27,78	0,50	75,77	37,76	736,71	294,89
	CP 10	1,350	30,95	0,50	83,26	41,78	367,54	105,35
	CP 11	1,337	30,96	0,51	81,70	41,39	401,98	103,70
	CP 12	1,312	31,66	0,52	80,56	41,55	388,17	93,42
	CP 13	1,442	30,72	0,47	94,67	44,29	150,00	31,62
	CP 14	1,385	33,67	0,49	95,42	44,29	150,00	31,54
	CP 15	1,382	33,66	0,49	94,94	44,29	150,00	29,54
VTS	CP 01	1,659	8,16	0,36	37,13	13,53	22611,21	210,48
	CP 02	1,626	8,52	0,38	36,73	13,85	21863,03	164,81
	CP 03	1,624	9,01	0,38	38,70	14,62	20161,66	216,88
	CP 04	1,617	11,59	0,38	49,27	18,75	13466,82	177,00
	CP 05	1,649	10,97	0,37	49,09	18,08	14341,64	170,70
	CP 06	1,639	10,13	0,37	44,60	16,60	16543,86	196,00
	CP 07	1,657	16,26	0,36	73,86	26,96	6323,90	178,05
	CP 08	1,726	15,61	0,34	79,54	26,94	6331,96	194,31
	CP 09	1,699	15,58	0,35	75,77	26,46	6625,28	195,88

CP 10	1,498	21,48	0,43	75,54	32,18	3787,73	91,82
CP 11	1,490	22,20	0,43	77,08	33,08	3444,09	96,63
CP 12	1,497	21,39	0,43	75,04	32,01	3855,20	100,51
CP 13	1,506	24,56	0,42	87,48	36,99	2182,00	46,89
CP 14	1,504	23,46	0,42	83,24	35,28	2691,29	45,98
CP 15	1,506	23,28	0,42	82,84	35,05	2762,99	46,56

Os Gráficos abaixo mostram a relação entre os valores de MR, sucção, teor de umidade e grau de saturação apresentados na Tabela acima de forma mais clara.



**Figura 10:** Relação entre: (a) MR versus Teor de umidade gravimétrico, (b) MR versus Grau de saturação e (c) MR versus Sucção.

Observando a Figura 10 e a Tabela 7, nota-se que a sucção dos solos utilizados nos experimentos está predominantemente entre 1000 e 10000 kPa e que quanto maior for a sucção menor será a saturação do solo, para todos os solos, fato justificado pela quantidade



de água presente. Além disso, a Tabela 7 confirma os estudos de Yao *et al.* (2018) já que mostra que o MR aumenta com o aumento da sucção do solo.

Fazendo um comparativo da Figura 7 com a Tabela 7, percebe-se que os resultados corroboram entre si, validando, assim, o que Souza *et al.* (2020) encontrou em sua pesquisa e o que foi discutido no presente estudo. Na perspectiva dos dados encontrados, o presente estudo juntamente com o dos autores estão alinhados e se complementam. Analisando os resultados com base no teor de umidade de compactação de cada solo e fazendo uma variação de 2%, para mais e para menos, é notório a diferença de MR e sucção.

Analisando cada solo estudado, o VTS apresenta a menor discrepância em termos de MR versus grau de saturação (Figura 10b), o solo diminui 163,92 MPa enquanto o LAD e REG diminuem 566,7 MPa e 340,1 MPa, respectivamente. Em contrapartida, o LAD apresenta a maior variação de MR, para teor de umidade e grau de saturação (Figura 10a e 10b). Já o REG cresce gradativamente ao diminuir a umidade.

Por fim, na Figura 10c, percebe-se que ao aumentar os valores de MR, a sucção também aumenta, para um mesmo solo. Porém, em relação aos três solos, o VTS apresentou os menores valores de MR e os maiores valores de sucção. Essa variação para solos de subleito, busca reproduzir o que acontece em campo devido às variações climáticas, como afirma Gonçalves (1999) e tal variação é de grande valia para os estudos de resistência dos solos.

#### **4. CONCLUSÃO**

Com os resultados alcançados, foi possível perceber a diferença entre os valores de módulo de resiliência e suas constantes obtidas, nas diferentes saturações, sendo este fator predominante na pesquisa. Os corpos de prova abaixo da umidade ótima apresentaram módulo de resiliência maior: variando de 203,93 a 644,94 MPa para o LAD, 100,82 a 332,03 MPa para o REG e de 96,32 a 197,39 MPa para o VTS, quando comparados acima da umidade ótima. Este comportamento é influenciado pela quantidade presente de água em cada corpo de prova ensaiado. Além disso, o solo encontra-se mais rígido, sofrendo menos deformações, estando em uma condição mais favorável, e, conseqüentemente os valores das constantes e coeficiente de determinação também aumentaram.

Ademais, as curvas de retenção do solo também mostraram que o aumento do módulo de resiliência equivale a maiores valores de sucção, o que dificulta a remoção de

água do solo e a sua drenagem, principalmente para solos mais argilosos, em virtude da alta concentração de argila nesses solos e conseqüentemente conseguirem reter mais água. Além disso, os resultados mostraram que quanto maior a saturação, menor será a sucção, para todos os solos estudados, em detrimento da quantidade de água presente em cada corpo de prova.

Vale a pena destacar que, mesmo sendo favorável ao comportamento resiliente dos solos, a secagem para teores abaixo do teor de umidade ótimo pode ocasionar contração em solos mais propensos ao fenômeno de expansão. Estes solos também estão mais suscetíveis aos danos causados pela penetração da água em sua rigidez, ou seja, os impactos do umedecimento após a compactação.

O presente estudo indicou haver uma diferenciação na sensibilidade apresentada por cada solo em relação a variação de MR *versus* grau de saturação, cabendo destacar a similaridade de comportamento apresentada entre o vertissolo (VTS) e o solo caulínico (LAD) de características geotécnicas tão diversas. Além desse fator, cabe destacar a relação MR *versus* sucção a partir da variação dos graus de saturação e teor de umidade ensaiados que mostrou resultados satisfatórios a pesquisa, tendo em vista que, foi notório o aumento da sucção a partir do aumento do MR e decréscimo da saturação dos solos (de 95% a 30%).

Os resultados apresentados e analisados mostram que o solo LAD teve o melhor desempenho para pavimentação, visto que é um solo arenoso e possui a melhor drenagem para escoamento da água, além dos maiores valores de módulo de resiliência.

## 5. REFERÊNCIAS

BERNUCCI, L. B. Módulo resiliente de solos lateríticos e sua aplicação ao dimensionamento de pavimentos de vias de baixo volume de tráfego. I Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego. Rio de Janeiro, (1997), p.490-508.

CHRYSTELLO, A. C. Avaliação de curvas de calibração do método do papel filtro tipo Whatman N° 42 utilizadas para estimar sucção matricial em solos não saturados. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

CUNTO, F. J. C. Determinação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos e a sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples: estudo de três solos do nordeste brasileiro. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

DAWSON, A. (ED.) Water in road structures: Movement, drainage & effects. Dordreque, Netherlands: Springer, 2008. Doi 10.1007/978-1-4020-8562-8.

- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER - ME 41. Solos – Preparação de amostras para ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 1994a. 4 p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER - ME 51. Solos – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1994b. 12 p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER - ME 82. Solos – Determinação do Limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994c. 3 p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER - ME 93. Solos – Determinação da Densidade Real. Rio de Janeiro, 1994d. 4 p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER - ME 122. Solos – Determinação do Limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1994e. 7 p.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT - ME 134. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT - ME 258. Solos – Compactação em equipamento miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2023.
- DORNELLES, L. E., SANTOS, T.A., OLIVEIRA, M. F., DAMO, T. P. & PINHEIRO, R. J. B. (2018). Análise comparativa entre a classificação MCT e o módulo de resiliência de solos da região de Santa Maria/RS. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Gramado.
- DRUMM, E. C., REEVES, J. S. & MADGETT, M. R. (1997). Subgrade resilient modulus correction for saturation effects. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 123, n. 7, p. 663-71, jul., 1997.
- FARIAS, M. M. (2004) Modelagem constitutiva para o comportamento mecânico de solos não saturados. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 2, 527, São Paulo.
- GONÇALVES, R. F. Estudo da influência da variação do teor de umidade no valor do módulo de resiliência de um solo argiloso encontrado em subleito de rodovias no interior paulista. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- LI, D., SELIG, E. T.. Resilient Modulus for Fine-Grained Subgrade Soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, 120(6), 939–957, 1994. doi:10.1061/(asce)0733-9410(1994)120:6(939).
- MALAQUIAS, G. A. P. *et al.* (2020) Caracterização e Classificação de Solos Típicos do Recôncavo Baiano para Fins Rodoviários, Anais do 20º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo.
- MIRANDA, S. B., OLIVEIRA, A. G. S, JESUS, A. C. (2006) Estudo Geológico – Geotécnico dos solos expansivos da região do recôncavo baiano, Salvador.
- NG, C. W. W., ZHOU, C., YUAN, Q., & XU, J. (2013). Resilient modulus of unsaturated subgrade soil: experimental and theoretical investigations. **Canadian Geotechnical Journal**, 50(2), 223–232. DOI:10.1139/cgj-2012-0052.
- NG, C. W. W.; BAGHBANREZVAN, S.; SADEGHI, H.; ZHOU, C.; JAFARZADEH, F. (2017). Effect of specimen preparation techniques on dynamic properties of unsaturated fine-

grained soil at high suctions. **Canadian Geotechnical Journal**, 54, 1310-1319. DOI:10.1139/cgj-2016-0531.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; RIBEIRO, D. M. & NETO, A. F. Comportamento mecânico dos grãos de feijão submetidos a compressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental/Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, v. 11, n. 4, p. 404-409, 2007.

RODRIGUES, M. R. Influência da sucção no módulo de resiliência de solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, UFRGS, 1997. 105p.

ROSA, A. C.; GUIMARÃES, A. C. R.; SILVA, L. F. M. (2021) Análise das propriedades físicas e mecânicas de um subleito ferroviário de solos tropicais, VI Encontro ANFT de ferrovias, Rio de Janeiro.

SANT'ANNA, G. L.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; MINETTI, L. J. (2003) Módulo de resiliência de um solo arenoso e de suas misturas com alcatrão fracionado e cal. *Sociedade de Investigações Florestais, Revista Árvore*, n. 4, p. 527-534, Viçosa.

SANTO, J. V., PICANÇO, J. L. (2022) Caracterização e análise da permeabilidade e porosidade do regolito no assentamento Marielle Vive (Valinhos, SP). XXX Congresso de Iniciação Científica, Unicamp, São Paulo.

SOUZA, F. C. S. *et al.* (2020) Curvas de retenção de água de três solos compactados do Recôncavo da Bahia, Anais do 20º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo.

SOUZA, F. C. S. *et al.* (2020) Influência da energia de compactação na curva de retenção de um solo típico de Cruz das Almas/BA, Anais do 20º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo.

SOUZA, F. C. S. *et al.* (2022) Avaliação da resistência não saturada de um solo expansivo típico do recôncavo baiano, Anais do 20º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo.

TANG, C; CHENG, Q; LENG, T; SHI, B; ZENG, H; INYANG, H. Effects of wetting-drying cycles and desiccation cracks on mechanical behavior of an unsaturated soil. **Journal Elsevier**, 2020.

THADKAMALLA, G. B. & GEORGE, K. P. (1995). Characterization of subgrade soils at simulated field moisture. *Transportation Research Record*, 1481, p. 21-27.

VIANA, H. M. F. Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais grossos do interior do estado de São Paulo. 2007, São Paulo.

YANG, S.; HUANG W.; TAI, Y. Variation of Resilient Modulus with Soil Suction for Compacted Subgrade Soils. **Journal of the National Academies**, 99-106, 2005.

YAO, Y.; ZHENG, J.; ZHANG, J.; PENG, J.; LI, J. Model for Predicting Resilient Modulus of Unsaturated Subgrade Soils in South China. **Journal of Civil Engineering**, 2089-2098, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-1703-1>.