

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV  
MESTRADO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**MURILO HENRIQUE DOS SANTOS NOVAES**

**COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE SOLOS COM CARÁTER RETRÁTIL  
DO SUL DO BRASIL**

**LAGES  
2023**

**MURILO HENRIQUE DOS SANTOS NOVAES**

**COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE SOLOS COM CARÁTER RETRÁTIL  
DO SUL DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientadora: Prof. Dra. Letícia Sequinatto  
Coorientador: Dr. Jean Alberto Sampietro

**LAGES  
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Universitária Udesc,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Novaes, Murilo Henrique dos Santos  
COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE SOLOS  
COM CARÁTER RETRÁTIL DO SUL DO BRASIL / Murilo  
Henrique dos Santos Novaes. -- 2023.  
115 p.

Orientadora: Letícia Sequinatto  
Coorientador: Jean Alberto Sampietro  
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de  
Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages,  
2023.

1. Compressibilidade. 2. Compactação. 3. CBR. 4.  
Retração. 5. Expansão. I. Sequinatto, Letícia. II. Sampietro,  
Jean Alberto. III. Universidade do Estado de Santa Catarina,  
Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de  
Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título.

**MURILO HENRIQUE DOS SANTOS NOVAES**

**COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE SOLOS COM CARÁTER RETRÁTIL  
DO SUL DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

**BANCA EXAMINADORA**

Presidente:

Orientadora: Prof.<sup>º</sup> Dra. Letícia Sequinatto

Departamento de Solos e Recursos Naturais – CAV/UDESC

Membro Interno:

Prof.<sup>º</sup> Dra. Luana da Silva

Departamento de Solos e Recursos Naturais – CAV/UDESC

Membro Externo:

Prof.<sup>º</sup> Dr. Douglas Rodrigo Kaiser

Universidade Federal da Fronteira Sul

Lages, 21 de junho de 2023.

Com minha família e Deus celebro este trabalho, e por assim fazerem parte desta jornada e me apoiarem em todos os momentos, vos dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente à Deus, a minha mulher e filha e meus familiares que foram minha base e prestaram apoio nestes anos de trabalho e aos amigos do LABPED e do LOPEF que sempre me apoiaram e foram a minha inspiração para a pós-graduação.

Aos meus orientadores e grandes amigos Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Letícia Sequinatto e Dr. Jean Alberto Sampietro, pelos ensinamentos, paciência e disponibilidade para atender e orientar.

Aos colegas e amigos do PPGCS da UDESC, que sempre estavam disponíveis a auxiliar mesmo que de longe.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, professores e técnicos pela oportunidade e ensinamentos.

À UDESC pelo ensino de qualidade e a CAPES pela concessão da bolsa.

A todos meus amigos e pessoas que apoiaram e acreditaram no meu potencial para que eu chegasse até aqui, a todos vocês dedico, **gratidão!**

“A humildade é o pilar para que o ser humano se edifique.” Samir José Soares

## RESUMO

O caráter retrátil, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS, é expressivo nas classes de Nitossolos e Latossolos. Nestes solos é notável a retração acentuada da massa de solo após a exposição dos perfis ao efeito de secagem prolongada. Objetiva-se aprofundar o conhecimento nestes solos, a fim de pautar como a compressibilidade, compactabilidade, resistência, pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) e o índice de compressão (Cc) age na estrutura destes solos. O estudo ocorreu em três etapas: (1) coleta dos solos contendo horizonte A (HA) e horizonte B (HB) para determinação das diferentes umidades e posterior compressão uniaxial, obtendo valores da  $\sigma_p$ , Cc e peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ); (2) limites de consistência, *Proctor* (energia normal, intermediária e modificada), classificação *Transportation Research Board* (TRB) e *Unified Soil Classification System* (USCS); (3) ensaio de Índice de suporte Califórnia (CBR) com avaliação da expansão. O delineamento foi inteiramente casualizado e os resultados da compressibilidade foram submetidos aos testes de normalidade (Kolmogorov-Smirnov), homogeneidade das variâncias (Bartlet), análises de variância (horizonte, umidade, horizonte x umidade), teste de comparação múltipla (Holm-Sidak), análise de correlação de Pearson (dados paramétricos) ou Spearman (não paramétricos) e regressão múltipla linear (Stepwise) e não linear (Marquardt). Foram retirados dos modelos os *outliers* e na modelagem da  $\sigma_p$  o método de Buscher (1990) foi utilizado, com ajuste de forma por regressão não linear. O Latossolo Bruno Distrófico Típico (LBVAC), Latossolo Vermelho Distrófico Retrátil (LVCN) e o Nitossolo Bruno Distrófico Húmico (NBCUR) foram coletados em taludes adjacentes a rodovias, são solos finos com textura argilosa e muito argilosa com média plasticidade. Pelo sistema TRB os solos foram classificados como A-7-5 ambos de sofrível a mau para aplicação em subleito, e na USCS como OH (argilas orgânicas de alta e média plasticidade). Na compressibilidade a  $\sigma_p$  teve variações significativas e mostrou-se menor na sucção matricial ( $\Psi_m$ ) de 6 kPa e teve tendência de aumento na  $\Psi_m \geq 500$  kPa. O Cc teve variações significativas e mostrou-se maior na  $\Psi_m$  de 6 a 100 kPa, e quando o solo apresentava densidade menor. Nos ensaios de Proctor os solos tiveram umidade ótima a compactação (Uoc) de 29,2 a 39,6% e o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dmáx}$ ) variou de 1,34 a 1,47 g/cm<sup>3</sup> entre os solos. Para o ensaio CBR foi considerada a curva Proctor Intermediária simulando uma energia compatível para solos de sub-base de pavimento, o LBVAC HB

apresentou o maior CBR = 17,96% e expansão de 0,29%. Os solos apresentaram valores de CBR < 20% e Expansão < 2% na Uoc enfatizando que não devem ser usados em sub-base de pavimento, porém uma estabilização química certamente aumentaria este CBR  $\geq$  20% ocasionando o possível uso em sub-base. Como os solos são retráteis em algum grau eles também são expansivos, logo em condição compactada na Uoc e saturada por 96 horas a máxima expansão alcançada foi no LBVAC HA (1,58%).

**Palavras-chave:** Compressibilidade; Compactação; CBR; Retração; Expansão.

## ABSTRACT

The “caráter retrátil”, according to the Brazilian Soil Classification System - SiBCS, is expressive in the Nitisols and Ferralsols classes. In these soils, the accentuated retraction of the soil mass is remarkable after exposing the profiles to the effect of prolonged drying. The objective is to deepen the knowledge in these soils, in order to guide how the compressibility, compactability, resistance, pre-consolidation pressure ( $\sigma_p$ ) and the compression index (Cc) act in the structure of these soils. The study took place in three stages: (1) collection of soils containing horizon A (HA) and horizon B (HB) to determine the different moisture content and subsequent uniaxial compression, obtaining values of  $\sigma_p$ , Cc and apparent dry specific weight ( $\gamma_d$ ); (2) consistency limits, Proctor (normal, intermediate, and modified energy), Transportation Research Board (TRB) and Unified Soil Classification System (USCS) classification; (3) The California Bearing Ratio (CBR) assay with expansion assessment. The design was completely randomized and the compressibility results were submitted to tests of normality (Kolmogorov-Smirnov), homogeneity of variances (Bartlet), analyzes of variance (horizon, humidity, horizon x humidity), multiple comparison test (Holm-Sidak), Pearson correlation analysis (parametric data) or Spearman (non-parametric data) and multiple linear (Stepwise) and non-linear (Marquardt) regression. Outliers were removed from the models and Buscher's (1990) method was used to model  $\sigma_p$ , with shape adjustment by non-linear regression. The *Latossolo Bruno* (Ferralsols) (LBVAC), *Latossolo Vermelho* (Ferralsols) (LVCN) and *Nitossolo Bruno* (Nitisols) (NBCUR) were collected from slopes adjacent to highways, they are fine soils with clayey and very clayey texture with medium plasticity. By the TRB system, the soils were classified as A-7-5, both from tolerable to bad for application in subgrade, and in the USCS as OH (organic clays of high and medium plasticity). In compressibility, the  $\sigma_p$  had significant variations and was lower in matric suction ( $\Psi_m$ ) of 6 kPa and tended to increase in  $\Psi_m \geq 500$  kPa. The Cc had significant variations and was higher in the  $\Psi_m$  from 6 to 100 kPa, and when the soil had lower density. In the Proctor tests, the soils had optimum moisture at compaction (Uoc) from 29.2 to 39.6% and the maximum density ( $\gamma_{dmáx}$ ) ranged from 1.34 to 1.47 g/cm<sup>3</sup> between soils. For the CBR test, the Intermediate Proctor curve was considered, simulating a compatible energy for pavement subbase soils, the LBVAC HB presented the highest CBR = 17.96% and expansion of 0.29%. The soils presented values of CBR < 20% and Expansion < 2%

in the Uoc emphasizing that they should not be used in subbase of pavement, however a chemical stabilization would certainly increase this  $CBR \geq 20\%$  causing the possible use in subbase. As soils are retractable to some degree they are also expansive, so in compacted condition at Uoc and saturated for 96 hours the maximum expansion achieved was at LBVAC HA (1.58%).

**Keywords:** Compressibility; Compaction; CBR; Retraction; Expansion.

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Classificação dos solos TRB ( <i>Transportation Research Board</i> ) .....	33
Quadro 2 – Sistema unificado de classificação de solos (SUCS) .....	34
Quadro 3 – Energias de compactação .....	39
Quadro 4 – Métodos diretos e indiretos de identificação de solos expansivos .....	43
Quadro 5 – Classificação Geológica dos Solos.....	45
Quadro 6 – Valores percentuais dos minerais que compõem as amostras, estimados por software.....	47

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – NBCUR HB com estrutura amolgada depois de atingir a umidade higroscópica com iminência de retração .....	25
Figura 2 – Histerese durante curva de secagem e umedecimento .....	26
Figura 3 – (a) Diferentes solos expansíveis em função da atividade da argila; (b) Classificação das amostras em função da atividade da argila. ....	31
Figura 4 – Carta de Casagrande .....	35
Figura 5 – Método de Casagrande para definir a $\sigma_p$ e o Cc .....	36
Figura 6 – Gráfico de compactação em três energias diferentes .....	40
Figura 7 – Camadas de um pavimento .....	42
Figura 8 – Localização dos solos em Santa Catarina e Rio Grande do Sul .....	44
Figura 9 – Perfil do solo NBCUR com mata nativa.....	46
Figura 10 – Amostras depois do “toalete” sendo saturadas por capilaridade.....	51
Figura 11 – Consolidômetro automatizado com IHM incorporada.....	52
Figura 12 – Execução do ensaio de compactação.....	54
Figura 13 – Corpo de prova compactado sendo rompido na prensa CBR .....	57
Figura 14 – Carta de Plasticidade de Casagrande.....	61
Figura 15 – Carta de Plasticidade de Casagrande com foco na mineralogia dos solos .....	62
Figura 16 – Classificação de expansibilidade de argilominerais e materiais argilosos .....	63
Figura 17 – Curvas de compressão do LBVAC. a) Horizonte A; b) Horizonte B. ....	68
Figura 18 – Diferença de retração do LBVAC HA e HB depois das amostras serem compactadas e secas em estufa .....	68
Figura 19 – Curvas de compressão normalizadas (a,b) evidenciando a densidade como parâmetro determinante na compressibilidade.....	69
Figura 20 – Curvas de compressão do LVCN. a) Horizonte A; b) Horizonte B. ....	70
Figura 21 – Curvas de compressão normalizadas (a,b) evidenciando a densidade como parâmetro determinante na compressibilidade .....	70
Figura 22 – Curvas de compressão do NBCUR. a) Horizonte A; b) Horizonte B. ....	71
Figura 23 – Curvas de compressão normalizadas (a,b) evidenciando a densidade como parâmetro determinante na compressibilidade .....	71
Figura 24 – Deformações dos solos em diferentes umidades (a,b) .....	72

Figura 25 – Amplitude no banco de dados das deformações (a,b) .....	73
Figura 26 – Deformações dos solos em diferentes umidades (a,b) .....	74
Figura 27 – Amplitude no banco de dados das deformações (a,b) .....	74
Figura 28 – Deformações dos solos em diferentes umidades (a,b) .....	75
Figura 29 – Amplitude no banco de dados das deformações (a,b) .....	75
Figura 30 – Estimativa da $\sigma_p$ utilizando as equações ajustadas.....	77
Figura 31 – Estimativa da $\sigma_p$ do NBCUR HA e HB em diferentes $\gamma_d$ .....	78
Figura 32 – Estimativa da $\sigma_p$ do LBVAC em diferentes $\gamma_d$ .....	79
Figura 33 – Estimativa da $\sigma_p$ do LVCN em diferentes $\gamma_d$ .....	79
Figura 34 – Índice de compressão estimado do LBVAC .....	82
Figura 35 – Índice de compressão estimado do LVCN .....	82
Figura 36 – Índice de compressão estimado no NBCUR .....	83
Figura 37 – Curvas de compactação (Proctor) do LBVAC nas energias (normal, intermediária e modificada) .....	85
Figura 38 – Curvas de compactação (Proctor) do LVCN nas energias (normal, intermediária e modificada) .....	86
Figura 39 – Curvas de compactação (Proctor) do NBCUR nas energias (normal, intermediária e modificada) .....	87
Figura 40 – Curvas de expansão e Índice de Suporte Califórnia (CBR) do LBVAC..	89
Figura 41 – Curvas de expansão e Índice de Suporte Califórnia (CBR) do LVCN....	90
Figura 42 – Curvas de expansão e Índice de Suporte Califórnia (CBR) do NBCUR.	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do solo encontrado no Acre .....	27
Tabela 2 – Faixas típicas de área superficial específica de diferentes minerais .....	30
Tabela 3 – Atividade de Skempton.....	31
Tabela 4 – Faixas típicas de LL e LP e atividade de diferentes minerais .....	32
Tabela 5 – Geologia predominante dos solos .....	45
Tabela 6 – Granulometria dos Solos .....	47
Tabela 7 – Índice de retração dos solos.....	48
Tabela 8 – Limites de Consistência dos Solos e Atividade da Argila .....	59
Tabela 9 – Classificação TRB e USCS .....	60
Tabela 10 – Valores médios relativos a quantidade de poros .....	64
Tabela 11 – Estatística descritiva para as propriedades e parâmetros físicos obtidos das curvas de compressão para os dois horizontes dos solos avaliados .....	67
Tabela 12 – Análise de Variância da Pressão de Pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) .....	76
Tabela 13 – Equações ajustadas para estimativa da pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) em função da umidade volumétrica ( $\theta_v$ ) e da densidade do solo ( $\gamma_d$ ) .....	77
Tabela 14 – Análise de Variância do Índice de Compressão (Cc) .....	80
Tabela 15 – Equações ajustadas para estimativa do índice de compressão (Cc) em função da umidade volumétrica ( $\theta_v$ ) e da densidade do solo ( $\gamma_d$ ) para todos os solos.....	81
Tabela 16 – Massa específica aparente seca máxima e Umidade ótima a compactação de cada solo .....	84
Tabela 17 – Grau de compactibilidade entre as curvas de compactação .....	87
Tabela 18 – Resultados máximos do Índice de suporte Califórnia.....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASE	Área superficial específica
CBR	Índice de suporte Califórnia
Cc	Índice de compressão
CV	Coeficiente de variação
C-E	Interestratificados caulinita-esmectita
DCP	Cone de penetração dinâmica
DN	Índice de penetração
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Dsi	Densidade do solo inicial
Dsf	Densidade do solo final
Dp	Densidade de partículas do solo
EUA	Estados Unidos da América
E.I.	Energia intermediária
E.M.	Energia modificada
E.N.	Energia normal
GC	Grau de Compactibilidade
HA	Horizonte A
HB	Horizonte B
IP	Índice de plasticidade
IR-A	Índice de retração anel com areia
IR-C	Índice de retração cole modificado
IR-M	Índice de retração mercúrio metálico
IR-T	Índice de retração tese - succção matricial e secamento em estufa
K	Permeabilidade
kPa	Kilopascal
LBVAC	Latossolo Bruno Distrófico Típico situado no município de Vacaria, RS
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de plasticidade
Lpeg	Limite de pegajosidade

LVCN	Latossolo Vermelho Distrófico Retráctico situado no município de Campos Novos, SC
MO	Matéria orgânica
MOS	Matéria orgânica do solo
N	Número de amostras
NBCUR	Nitossolo Bruno Distrófico Húmico situado no município de Curitibanos, SC
PT	Porosidade total
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRB	Transportation Research Board
TFSA	Terra fina seca ao ar
$U_m$	Umidade na moldagem
Uoc	Umidade ótima à compactação
USCS	Unified Soil Classification System
VBA	Virtual Basic for Applications
%Inc	Incremento da densidade do solo em relação ao estado inicial
2:1 HE	Argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas

## **LISTA DE SÍMBOLOS**

$\gamma_d$	Densidade do solo ou peso específico aparente seco
$\gamma_{dmáx}$	Densidade máxima do solo
$\sigma_p$	Pressão de pré-consolidação
$\Psi_m$	Sucção matricial
$\sigma$	Tensão normal
$\theta$	Umidade
$\theta_v$	Umidade volumétrica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1	HIPÓTESES .....	23
1.2	OBJETIVOS.....	24
1.2.1	Objetivos específicos .....	24
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>25</b>
2.1	SOLOS COM CARÁTER RETRÁTIL.....	25
2.2	COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO.....	28
2.3	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MINERALÓGICA .....	29
2.3.1	Limites de consistência.....	31
2.4	CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS .....	32
2.5	COMPRESSIBILIDADE .....	35
2.6	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO (PROCTOR) .....	39
2.7	ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR) .....	41
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>44</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO .....	44
3.2	ANÁLISES REALIZADAS .....	48
3.2.1	Limites de consistência.....	48
3.2.2	Compressibilidade .....	50
3.2.3	Ensaio de compactação (PROCTOR) .....	52
3.2.4	Índice de suporte Califórnia (CBR) .....	55
3.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	58
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>59</b>
4.1	LIMITES DE CONSISTÊNCIA .....	59
4.2	COMPRESSIBILIDADE .....	64
4.2.1	Pressão de pré-consolidação ( $\sigma_0$ ) .....	76
4.2.2	Índice de compressão (Cc) .....	80
4.3	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO (PROCTOR) .....	83
4.4	ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR) .....	88
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>93</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>94</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>95</b>
	APÊNDICE A – GRAU DE COMPACTAÇÃO DOS SOLOS .....	104

APÊNDICE B – CORRELAÇÃO DE SPEARMAN ENTRE AS PROPRIEDADES E PARÂMETROS FÍSICOS OBTIDOS PARA OS SOLOS AVALIADOS .....	105
APÊNDICE C – GRÁFICOS DOS LIMITES DE LIQUIDEZ DOS SOLOS ....	107
ANEXO A – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – LBVAC.....	108
ANEXO B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – LVCN.....	110
ANEXO C – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – NBCUR.....	112
ANEXO D – BOLETIM METEOROLÓGICO DE VACARIA .....	115

## 1 INTRODUÇÃO

Os Nitossolos e Latossolos são solos com grande relevância nacional, sendo 1,5% e 39% dos solos do Brasil, respectivamente (SANTANA *et al.*, 2021ab), sendo de grande importância para a exploração agrícola, especialmente no estado de Santa Catarina.

De acordo com conceito apresentado no Sistema Brasileiro de Classificação dos solos – SiBCS (SANTOS *et al.*, 2018), os Nitossolos compreendem solos constituídos por material mineral, com horizonte B nítico, textura argilosa ou muito argilosa com teores de argila iguais ou maiores que  $350 \text{ g kg}^{-1}$  de terra fina seca ao ar (TFSA) desde a superfície do solo, estrutura em blocos subangulares ou angulares ou prismática, de grau moderado ou forte, com cerosidade expressiva e/ou caráter retrátil; Já os Latossolos compreendem solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizontes diagnóstico e superficial, exceto hístico.

Alguns Latossolos e Nitossolos, nas sub-ordens Brunos e Vermelhos, encontrados sob condições de clima subtropical úmido dos planaltos alto-montanos do sul do Brasil, apresentam o caráter retrátil. Este decorre da retração acentuada da massa de solo após a exposição dos perfis ao efeito de secagem por algumas semanas, resultando na formação de fendas verticais pronunciadas e estruturas prismáticas grandes e muito grandes, que se desfazem em blocos quando manuseadas (SANTOS *et al.*, 2018).

A partir da mineralogia, TESTONI (2015) concluiu que o caráter retrátil decorre possivelmente da presença interestratificados caulinita-esmectita e esmectita com polímeros de hidróxi-Al entrecamadas. SILVA *et al.*, (2017) estudou e apresentou uma metodologia quantitativa do caráter retrátil. Já, TESTONI *et al.*, 2017, apresenta um estudo da mineralogia desses solos.

Dada a característica bastante peculiar e que carece de um maior conhecimento, especialmente no que tange o seu comportamento físico e mecânico e também nas potencialidades de uso dos solos, o estudo da compressibilidade, compactação e resistência destes solos faz-se importante, uma vez que resultará no entendimento em como os mesmos se comportam.

A compressibilidade abrange parâmetros da capacidade de suporte de carga (deformações elásticas) em diferentes umidades, e ainda, determina indicadores das

deformações plásticas, que são irreversíveis, pois altera a estrutura física do solo (porosidade).

A compactação busca aprimorar o conhecimento dos solos e definir seu possível uso em estradas, pois a avaliação em três diferentes energias define se meu solo é mais suscetível a compactação ou não conforme o incremento de energia no mesmo, pois alguns solos têm trabalhabilidade similar, ou seja, o uso do rolo compressor com menor energia ou com diversas passadas sobre o pavimento, acarretará em incremento similar de  $\gamma_d$ .

A resistência complementa a ação da compactação, pois gera resultados a partir deste e realça os possíveis uso dos solos seja ele para sub-leito, sub-base ou base de pavimento, ou seja, nem sempre é necessária a retirada de todo o solo superficial, onerando os custos com máquinas e bota-fora, pois com as análises corretas pode-se determinar o potencial dos solos acerca da resistência ao tráfego.

O avanço no entendimento destas questões vem a complementar o conhecimento já existente acerca do caráter retrátil em Nitossolos e Latossolos Brunos e Vermelhos do Sul do Brasil, além de indicar potencialidades de uso.

## 1.1 HIPÓTESES

- I - Quanto maior a expressividade do caráter retrátil, menor é a  $\sigma_p$  e o  $C_c$  é maior, pois quanto mais retrátil o solo for menor é a capacidade de suporte que ele detém, ou seja, deforma-se com maior facilidade e com menor carga.
- II - Solos retráteis com maior quantidade de matéria orgânica tendem a serem mais compressíveis gerando menor  $\sigma_p$  e maior  $C_c$ , pois a matéria orgânica atua como uma mola no solo, gerando capacidade de rearranjo elástico e descompactação do solo ao passar do tempo, porém diminui a resistência do solo se o mesmo for usado em pavimentos de estradas.
- III – Ainda que os solos têm capacidade de retração e expansão os mesmos podem ser usados em estradas rurais como subleito e sub-base de pavimento, pois são solos subtropicais que apresentam boa resistência e podem se adequar a determinados tipos de usos com cargas moderadas de tráfego.

## 1.2 OBJETIVOS

Avaliar o comportamento físico-mecânico de três solos retráteis com ênfase na compressibilidade, compactabilidade e resistência do solo e nos parâmetros geotécnicos a fim de obter resultados acerca da expansão e quanto ao uso em estradas rurais.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Definir a partir dos parâmetros de consistência o enquadramento dos solos perante as classificações TRB e USCS, e avaliar se os solos são expansivos a partir da Carta de Plasticidade de Casagrande.

Estimar a partir dos parâmetros de compressibilidade a “Pressão de Pré-consolidação” e “Índice de Compressão”.

Estabelecer a “Curva de Compressão” destes solos e definir a massa específica aparente seca máxima e umidade ótima a compactação, em diferentes energias.

Determinar o “Índice de Suporte Califórnia (CBR)” e a expansão na condição compactada que estes solos possuem.

Correlacionar os parâmetros mecânicos com a granulometria e os índices de retração dos solos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 SOLOS COM CARÁTER RETRÁTIL

A definição de solo para muitas pessoas pode ter características diferentes ao seu conhecimento, ele é um recurso natural formado pelo intemperismo das rochas que ao longo de milhares e até milhões de anos resultam no solo propriamente dito (REICHERT *et al.*, 2009) cuja função principal é gerar cerca de quase todos alimentos disponíveis em todo o mundo por intermédio das plantas, ou seja, o solo é vida e traz consigo outras características de suma importância como a capacidade de sustentar as plantas que por meio da fotossíntese geram oxigênio e também de resistir a esforços mecânicos e dar suporte a estradas e edificações, como também sustentar a fauna, a flora e os rios (LIMA *et al.*, 2007).

O caráter retrátil foi inserido em 2013 no SiBCS, comprehende-se que ocorre nos Latossolos e Nitossolos, ambos Brunos e Vermelhos, onde estes apresentam acentuada retração da massa do solo quando exposto à secagem. Nos cortes com maior exposição solar, os blocos tendem naturalmente a se individualizar em unidades estruturais cada vez menores que se desprendem da massa do solo e se acumulam na parte inferior do perfil, configurando uma forma triangular semelhante a uma “saia” ao se observar lateralmente a seção vertical do perfil (SANTOS *et al.*, 2018).

Embora, nesses solos objeto de estudo, conforme a figura 1, predomine minerais secundários como a caulinita, o caráter retrátil decorre possivelmente da presença de argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas (esmectita com hidróxi-Al), interestratificados caulinita-esmectita (C-E) e/ou da pequena dimensão dos argilominerais presentes na fração argila. Este caráter é típico de alguns solos encontrados sob condições de clima subtropical úmido dos planaltos alto-montanos do sul do Brasil, sua metodologia quantitativa foi proposta por Silva *et al.*, (2017).

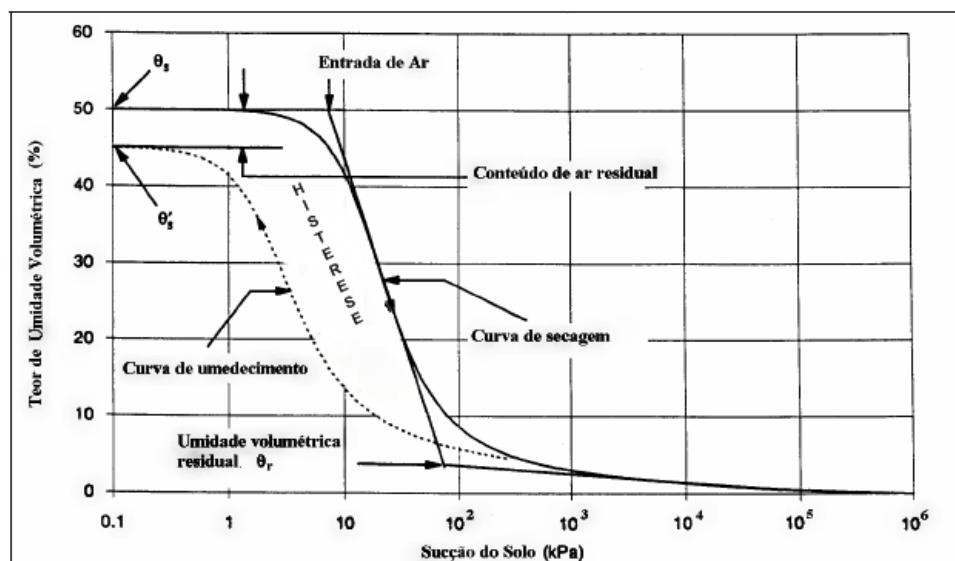
Figura 1 – LBVAC com estrutura exposta em perfil de corte de talude com iminência de retração



Fonte: Luana da Silva (2015).

No contexto a classificação do caráter retrátil no SiBCS, segundo SANTOS *et al.*, 2018 visa a retração dos solos no período de secagem, mas não reflete as alterações físicas do solo no período de umedecimento, ou seja, para uma melhor compreensão do potencial destes solos os mesmos devem ser analisados perante a condição não saturada e saturada, na figura 2 a histerese é exemplificada, onde FREDLUNG *et al.*, (1994) retratam que os solos apresentam uma faixa que podem existir várias curvas características para um mesmo tipo de solo, na zona da histerese.

Figura 2 – Histerese durante curva de secagem e umedecimento



Fonte: FREDLUNG *et al.*, (1994). Modificado pelo autor.

Gubiani *et al.*, (2015), constataram em um Latossolo vermelho distroférreo que houve mudança na estrutura física do solo, após o efeito do umedecimento e secagem em amostras, onde analisaram os efeitos da contração e expansão.

O caráter retrátil que Latossolos e Nitossolos possuem faz com que a histerese seja preponderante, pois as fendas ficam expressivas em condições de secagem, permanecendo iminentes mesmo após o umedecimento do solo (ANDOGNINI, 2019).

No SiBCS a menção do caráter retrátil refere-se a Latossolos e Nitossolos, porém este caráter possivelmente ocorre também em outros tipos de solos, segundo Barbosa *et al.*, (2018) solos encontrados no Acre apresentam argilominerais (2:1) em sua composição mineralógica e a iminência visual de retração quando seco e expansão quando saturado. No difratograma de raio-x é possível perceber a esmectita e a caulinita como mineral presente, denotando similaridade com os solos apresentados neste trabalho.

Todavia a granulometria, limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) deste solo é totalmente diferente (Tabela 1) juntamente com a coloração cinza mosqueada com vermelha, levando a conclusão de que se trata de um solo mais arenoso, então Latossolos e Nitossolos não são os únicos solos que apresentam retração/expansão.

Tabela 1 – Características do solo encontrado no Acre

<b>Argila (%)</b>	30,6
<b>Silte (%)</b>	12,7
<b>Areia fina (%)</b>	56,7
<b>LL(%)</b>	86
<b>LP(%)</b>	43
<b>IP(%)</b>	43
<b>D<sub>p</sub> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,74

Fonte: Barbosa *et al.*, (2018)

Recentemente em 2021 foi proposta uma norma nos EUA que visa dois métodos para avaliar solos com potencial expansivo e colapsável, a ASTM D4546-21 - *Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils*. Esta metodologia pode ajudar nas investigações futuras e aprimorar os dados sobre a expansão destes solos.

No Brasil existem vários locais com solos expansivos, com maior ocorrência no Nordeste do país. Na região Sul e em São Paulo foram descobertos solos expansivos, em camadas superficiais de podzólicos (argissolos) por exemplo, das Formações Passa Dois, Grupo Tubarão e Formação Santa Maria no Rio Grande do Sul (VARGAS *et al.*, 1989) *apud* VILAR (2015).

## 2.2 COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO

O comportamento físico-mecânico do solo é regido pela compressibilidade, compactabilidade e resistência. Segundo Marangon (2018) na compressibilidade quando um material é submetido a um carregamento este tende a deformar.

Ainda enfatiza que a matriz do solo pode ser modificada com a ação de agentes externos, ou seja, uma tensão/carregamento pode desestabilizar as partículas, causando uma ruptura, este comportamento o difere de outros materiais, pois o solo é um elemento natural, e apresenta estrutura multifásica cuja fase sólida é representada pelas partículas de solo, a fluída pela água e a gasosa pelo ar.

A compressibilidade é definida pela diminuição do volume através de carregamentos que o solo é submetido cuja variação de volume pode depender do tempo, atribuindo-lhe comportamento de tensão-deformação. (MARANGON, 2018)

Todavia a compactabilidade do solo pode ser descrita pelo incremento de densidade e redução na porosidade do solo, quando este sofre um carregamento contínuo. (FURLANI; SILVA, 2016)

Os solos não saturados são usados em larga escala na engenharia, alguns destes apresentam comportamento expansivo e colapsível, que traz à tona uma problemática ligada a estes, pois as variações no teor de umidade ocasionam a expansão e/ou podem ocasionar o colapso. (AGNELLI; ALBIERO, 1997 *apud* CHAGAS; MOURA; CARNEIRO, 2019).

Tendo em vista que os solos são diferentes, estes devem ser estudados, a partir da avaliação físico-mecânica, onde a compactação faz-se presente.

Neste processo o índice de vazios diminui com o aumento gradativo do teor de umidade, onde ocorre a expulsão do ar afetado pela energia de compactação cujas partículas se aproximam, acarretando maior área de contato entre as partículas gerando incremento da resistência mecânica, ou seja, o solo obtém incremento na densidade, diminuindo a infiltração e a permeabilidade (SANTOS, 2008).

Por outro lado, temos a compactação excessiva próxima as raízes de plantas, onde este altera o ambiente físico do solo que é caracterizado por, temperatura, umidade, aeração e resistência mecânica, ou seja, se alguma propriedade for alterada, as outras sofrerão mudanças variáveis, de acordo com o nível de compactação do solo (BOONE; VEEN, 1994 *apud* SAMPIETRO, 2013).

A determinação da resistência do solo pode ser obtida através do ensaio de Cone de penetração dinâmica (DCP), onde a avaliação das camadas superficiais é realizada em solos com estrutura indeformada e compactados, mensurando agilidade e eficácia. (RESENDE; OLIVEIRA FILHO; NOGUEIRA, 2013).

### 2.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MINERALÓGICA

A avaliação do comportamento mecânico está ligada a caracterização física do solo, este por sua vez é de suma importância para entender qual tipo de solo está disposto no local (argiloso, siltoso ou arenoso), a partir disto pode-se inferir a adequação em fases construtivas ou de manutenção das camadas do pavimento, ou seja, ensaios laboratoriais resultam em importantes descobertas cujas propriedades servem para o controle de qualidade do solo, tais como: grau de compactação, umidade, composição granulométrica, massa volumétrica, limites de consistência, retração e expansão.

Essas propriedades remetem à adequabilidade, onde evidencia a necessidade ou não de corrigir a composição granulométrica do solo em determinado uso na construção de um pavimento, pois viabiliza a escolha do método construtivo mais preciso e eficaz em cada cenário (SANTOS, 2012 *apud* VARGAS, 2021).

Os valores de maior densidade das partículas (D<sub>p</sub>) destes solos tem ligação com a mineralogia, pois compostos ferruginosos que predominam nos solos, podem alcançar valores superiores a 3,00 g/cm<sup>3</sup> (FERREIRA, 2010; SCHWERTMANN & TAYLOR, 1989 *apud* SILVA, 2015).

Testoni, 2015 avaliou um Latossolo de Cascavel com características muito parecidas ao LVCN, mas sem apresentar característica de retração, e este teve valores de C-E de 12 e 13% para horizonte A (HA) e horizonte B (HB) respectivamente, valores estes cerca de três vezes menores que os encontrados nos solos com característica de retração, já os argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas (2:1

HE) esteve presente com valores similares aos encontrados nos outros solos com caráter retrátil.

Na tabela 2 temos a área superficial específica (ASE) de cada mineral, e demonstra o quanto maior é a ASE da esmectita se comparada a caulinita, fator este denota a maior capacidade de retenção de água em solos dessa natureza, e ainda remete a diferenciação da permeabilidade (K), pois se o solo consegue reter mais água a sua K consequentemente é maior.

Tabela 2 - Faixas típicas de área superficial específica de diferentes minerais

Mineral de Argila	ASE (m <sup>2</sup> /g)
Caulinita	30-110
Haloisita	35-70
Vermiculita	40-80
Ilita	65-100
Esmectita	50-800

Fonte: Sogak (2005) *apud* Firoozi *et al.*, (2016)

Segundo Barbosa *et al.*, (2022) a esmectita tem formação facilitada em locais em que a evapotranspiração excede a quantidade de precipitação, levando os solos a elevadas succções matriciais causando a retração.

Segundo DAL PAI, (2005) a grande parte dos solos lateríticos, de textura argilosa e muito argilosa têm capacidade de expansão mesmo que em pequeno grau, depois da compactação na Uoc, e logo após exposto a embebição na água. A autora ainda menciona que algumas argilas expandem devagar e podem ter como característica uma elevada pressão de expansão.

Para avaliar a retração ou contração do solo existem diversas metodologias a serem empregadas, segundo DAL PAI, (2005) a retração do solo não é uma característica classificada como muito importante na geotecnia universal, mas, no entanto, em regiões tropicais, a contração que o solo exerce é considerada muito importante, pois a utilização destes solos em pavimentação acarreta em patologias nos pavimentos, por intermédio da capacidade de contração e expansão.

Acerca destas questões foi criada a metodologia Miniatura, Compactado, Tropical (MCT), desenvolvida por Nogami e Villibor (1981), onde o ensaio de

contração faz-se presente juntamente com seu detalhamento para execução. (DAL PAI, 2005).

### 2.3.1 Limites de Consistência

Com o LL e LP pode-se obter o IP que caracteriza uma interpretação da plasticidade dos solos, juntamente com a capacidade de drenagem.

Segundo Skempton (1953) existe um conceito de atividade dos solos (tabela 3), que determina o potencial de inchaço que o solo expansivo apresenta, o conceito ficou conhecido como índice de atividade de Skempton (atividade do argilomineral).

Tabela 3 – Atividade de Skempton

<b>ARGILA INATIVA</b>	$A < 0.75$
<b>ARGILA NORMAL</b>	$0.75 < A < 1.40$
<b>ARGILA ATIVA</b>	$A > 1.40$

Fonte: SKEMPTON (1953). Modificado pelo autor

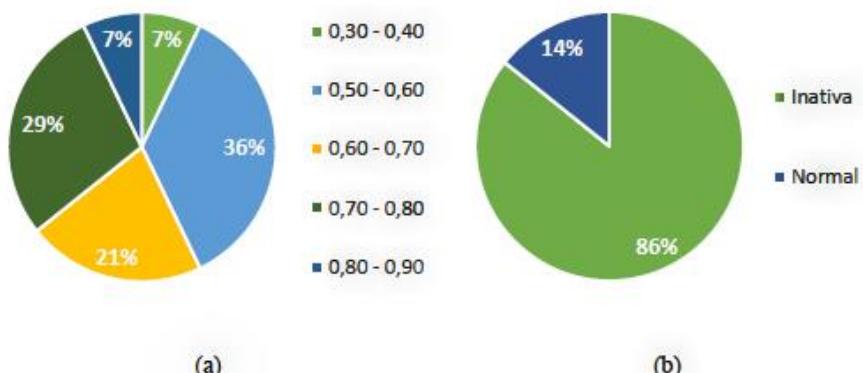
Onde “A” representa a atividade da argila, por intermédio da equação (1):

$$A = \frac{IP(\%)}{\text{Argila} (\%)} \quad (1)$$

A = Atividade de Skempton; IP = Índice de Plasticidade.

Segundo Varela (2021) a maioria dos solos estudados com potencial expansivo no país apresenta característica de argila inativa, o que descarta a hipótese de solos com característica inativa não serem expansíveis (figura 3ab).

Figura 3: (a) Diferentes solos expansíveis em função da atividade da argila; (b) Classificação das amostras em função da atividade da argila



Fonte: Varela (2021)

A tabela 4 correlaciona a atividade dos argilominerais com os limites de consistência, evidenciando que se a atividade é alta o LL e LP também é alto, consequentemente tendem a serem mais expansíveis.

Os solos com origem caulinítica apresentam atividade baixa e consequentemente LL e LP mais baixos, logo a tendência destes solos é serem menos expansíveis.

Tabela 4: Faixas típicas de LL e LP e atividade de diferentes minerais

Mineral	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Atividade
Montmorilonita	100-900	50-100	1-7
Ilita	60-120	35-60	0.5-1
Caulinita	30-110	25-40	0.5

Fonte: Sirivitmaitrue (2008) *apud* Firoozi et al., (2016)

## 2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

As mais tradicionais classificações de solos na Engenharia são a USCS e TRB. O sistema USCS foi criado pelo Engenheiro Arthur Casagrande e faz parte da norma D2487-17 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM). A classificação agrupa os tipos de solos em três tipos: grossos, finos e turfas (organossolos).

A classificação pelo sistema TRB - *Transportation Research Board*, está disposta no quadro 1, nos dias atuais integra o documento M 145 da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e faz parte da norma ASTM D3282-15. Neste sistema os solos são subdivididos em duas grandes áreas: materiais granulares e silto-argilosos, e ainda descreve o comportamento do material se usado em subleito, estes que possuem mais de 35% de material passante na peneira nº 200, são classificados perante a tabela como “sofrível a mau”.

Esta classificação “sofrível a mau” foi discutida por diversos pesquisadores, fato este que foi mais que comprovado, nos últimos anos, que não representa a realidade geotécnica dos solos tropicais brasileiros (SOUSA, 2021), pois a tabela é americana e tem mensuração aos solos predominantes nos Estados Unidos da América (EUA), a realidade do Brasil é outra, onde a maioria dos solos são argilosos e muitos deles alcançam uma boa resistência de CBR, denotando que apresentam boa aplicação em subleito ou até mesmo em sub-base de pavimento.

O grupo de materiais granulares é classificado se 35% ou menos passa na peneira de Nº 200 (0,075 mm), para determinar se os solos apresentam a classificação silto-argilosos, o material passante na peneira de Nº 200 deve ser maior que 35%. Na fração mais grosseira temos os pedregulhos, estes foram considerados os materiais que passam na peneira de abertura nominal de 76 mm e ficam retidos na peneira de Nº 10 (2 mm). A areia grossa então seria o material passante na peneira de Nº 10 e que teria sua retenção na peneira de Nº 40 (0,42 mm), a areia fina é considerada o material passante da peneira de Nº 40 e que sua retenção é iminente na peneira de Nº 200, o silte juntamente com a argila seria a fração passante na peneira de Nº 200. (MACHADO; LIMA; CARVALHO; 2013 *apud* VARGAS, 2021).

Quadro 1 – Classificação dos solos TRB (*Transportation Research Board*)

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº10	50 máx.										
Nº40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 max.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: DNIT (2006).

\* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

No quadro 2 a classificação USCS na nomenclatura americana é conhecida no Brasil como “Sistema unificado de classificação de solos (SUCS)”, diferentemente da

TRB, explana que solos de graduação fina devem ter o material passante na peneira Nº 200 um valor maior que 50%, e por intermédio do LL e a textura diferencia as classes dos solos.

A SUCS é amplamente utilizada na engenharia para classificar os solos, onde os que apresentam graduação grossa são aqueles que permanecem retidos mais de 50% de material na peneira de Nº 200.

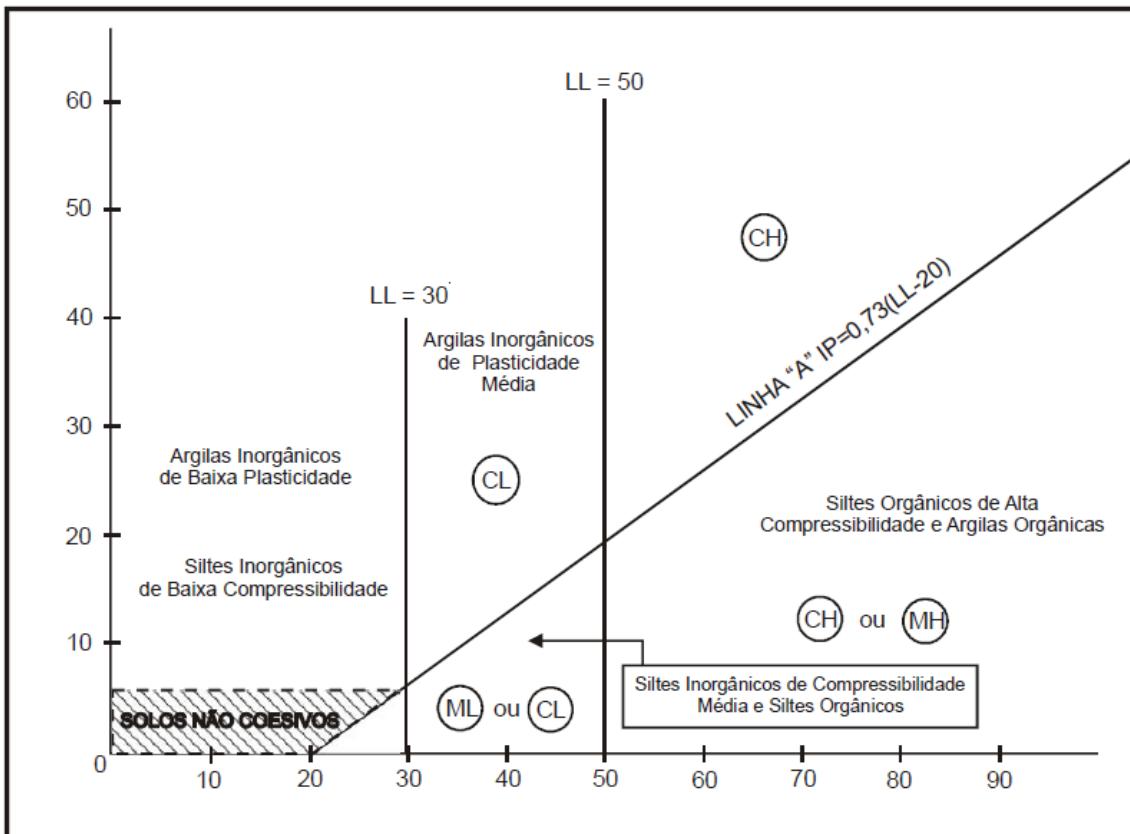
Quadro 2 – Sistema unificado de classificação de solos (SUCS)

<b>SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA:</b> Mais de 50% retido na peneria nº 200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped. com pouco ou nenhum fino.
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped. com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped. areia e argila.
			GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped. areia e argila.
	Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira nº 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas – Misturas de areia e silte.
			SC	Areias argilosas – Misturas de areia e argila.
	SILTES e ARGILAS com LL ≤ 50	ML	Siltes inorgânicos – Areias muito finas – Areias finas siltosas e argilosas.	
		CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade – Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.	
		OL	Siltes orgânicos – Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.	
<b>SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA:</b> 50% ou mais passando pela peneria nº 200	SILTES e ARGILAS com LL > 50	MH	Siltes – Areias finas ou siltes micáceos – Siltes elásticos.	
		CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.	
		OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade.	
	Solos Altamente Orgânicos	PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.	

Fonte: DNIT (2006).

Para uma melhor classificação dos solos de graduação fina, segundo a figura 4, onde dá-se o resultado por intermédio da carta de Casagrande cuja delimitação do comportamento dos solos deve-se a partir do LL (eixo das abcissas) e do IP (eixo das ordenadas), estes são métodos dispostos na literatura que buscam compreender a diversidade dos solos de graduação fina existentes.

Figura 4 – Carta de Casagrande



Fonte: DNIT (2006).

## 2.5 COMPRESSIBILIDADE

O termo compressibilidade vem sendo adotado desde meados de 1933 na área da engenharia civil (SOANE, 1990), e este termo ganhou força quando foi criado o Ensaio Proctor Normal ou suas variantes, que são usados até os dias atuais para avaliar a susceptibilidade à compactação de um solo, ou seja, o teste foi desenvolvido pelo engenheiro Ralph Proctor para quantificar a umidade adequada a fim de se obter a máxima compactação do solo e usar os resultados na construção de barragens e estradas (VARGAS, 1977).

A expansão veio à tona ao setor agrário com as problemáticas relacionadas ao tema cujo exemplo clássico é a menor capacidade que o sistema radicular das plantas tem em face à compressibilidade dos solos, a limitação gerada decorrente deste problema afeta a qualidade de vida da planta e a capacidade de crescimento, resultando em uma qualidade de frutos e sementes inferior ao desejado pelo agricultor, acarretando ainda menor lucro na venda da safra destas culturas.

O solo, ao ser exposto à tensão, natural ou antrópica, sofre deformação. Com

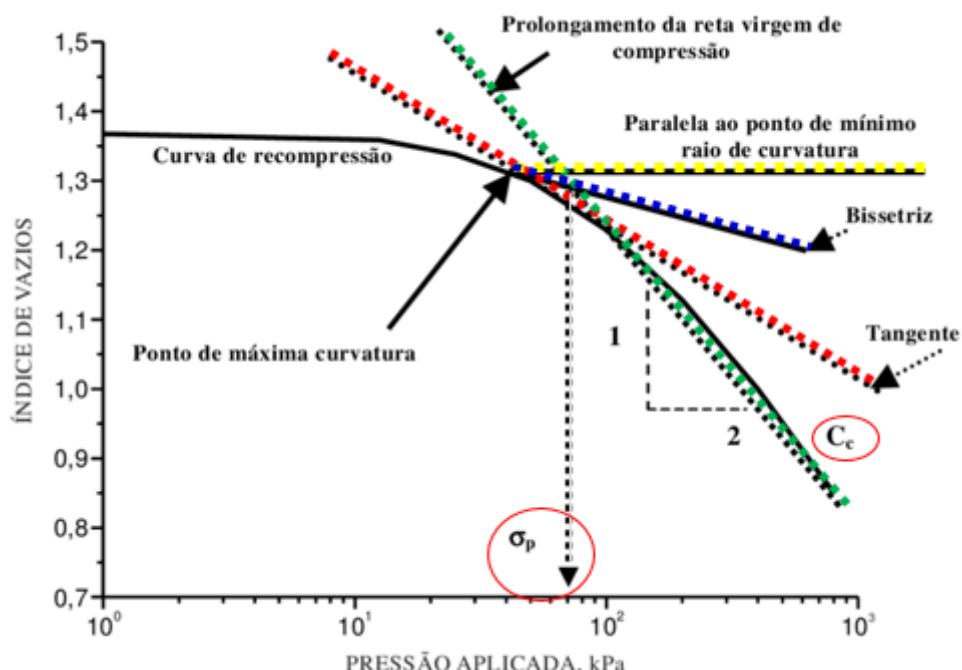
a aplicação de cargas ao solo, ocorre compactação do solo, resultando em modificações na estrutura do solo, com aumento da densidade e da resistência do solo (SOANE; VAN OUWERKERK, 1994; KONDO; DIAS JUNIOR, 1999).

Com a compactação dos solos há um aumento da densidade e da resistência do solo, redução da porosidade, principalmente macroporosidade ou porosidade de aeração (poros maiores que 50 µm), além de afetar diversos atributos do solo como a condutividade hidráulica, K, infiltração de água e outras características ligadas à porosidade do solo.

Essas alterações físicas, provocadas pela compactação, afetam o fluxo ou a concentração de água, oxigênio, dióxido de carbono, nutrientes e temperatura, que podem limitar o crescimento e desenvolvimento das plantas e causar problemas ambientais (STEPNIEWSKI et al., 2002).

Buscando entender a compressibilidade são realizados ensaios de amostras com estruturas indeformadas, avaliando como o solo não saturado se comporta durante sucessivos carregamentos crescentes, o método para encontrar a pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) e o índice de compressão ( $C_c$ ) segue as recomendações de Casagrande, 1936, e está exposto na figura 5:

Figura 5 – Método de Casagrande para definir a  $\sigma_p$  e o  $C_c$



Fonte: REICHERT et al., (2002). Modificado pelo autor.

Para predizer os efeitos antrópicos sobre a estrutura do solo preconiza-se o uso da pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ). Esta é uma propriedade mecânica do solo obtida em laboratório, indicadora da pressão máxima que pode ser aplicada ao solo de maneira que não ocasione compactação adicional (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996). De acordo com a publicação EM 1110-2-1906 (US DEPARTMENT OF THE ARMY, 1970), o ensaio de compressibilidade consiste no processo de transferência gradual de uma carga aplicada ao solo até que todos os vazios deste sejam comprimidos.

A amostra indeformada de solo é confinada lateralmente em anel de aço, com drenagem livre nas extremidades superior e inferior, e submetido a incrementos sucessivos de pressão vertical (US DEPARTMENT OF THE ARMY, 1970). A aplicação no solo de pressões menores do que a  $\sigma_p$  causa deformações elásticas (recuperáveis), enquanto a aplicação de pressões maiores causa deformações plásticas, não recuperáveis (HOLTZ; KOVACS, 1981).

Vale ressaltar que o processo de compactação é influenciado pelos teores de MO (ZHANG *et al.*, 1997), e conforme o incremento são observadas diminuição da densidade e do grau de compactação (ARVIDSSON, 1998). A MO também atua na compressibilidade do solo afetando sua elasticidade e tem efeito determinante na formação e estabilização de agregados do solo (BRAIDA *et al.*, 2008).

No estudo conduzido por Marques Junior *et al.*, (2008) os autores comprovaram que quanto maior a porosidade total (PT), menor a densidade e mais rápida a K do solo, com isso maior é a quantidade de carbono dissolvido na solução do solo, pois o aumento na macroporosidade do solo reduz o contato de solutos orgânicos com a matriz do solo, predispondo a maiores perdas de MO dissolvida.

Informações sobre a  $\sigma_p$  georreferenciadas por meio do uso do Sistema de Posicionamento Global (GPS) permite a criação de mapas de tráfegos, os quais têm sido empregados para o estudo da resistência mecânica do solo (SILVA *et al.*, 2007; KAMIMURA *et al.*, 2013). Este também pode ser utilizado para identificar ambientes de menor resistência mecânica, ou seja, mais favoráveis a degradação, onde devem ser adotadas práticas conservacionistas para preservação dos solos.

O tráfego sobre o solo que está na Uoc, a partir de máquinas e/ou animais sobre o solo, é uma das principais causas da compactação excessiva, que pode ser observada em muitas culturas e acarreta danos à produção, ou seja, a umidade presente no solo é um dos principais fatores que controlam o grau de compactação (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; SILVA *et al.*, 2002b).

O teste de compressibilidade avalia a elasticidade, suporte de carga e a suscetibilidade à compactação de um solo. A partir destes princípios sabemos que o trânsito de máquinas comprime os solos trazendo mudanças em sua estrutura como o preenchimento de espaços de vazios e a tensão da água em retenção nos poros (LARSON; GUPTA, 1980).

A compressibilidade do solo é caracterizada como a resistência em diminuir seu volume quando submetido a tensões. Por conter este comportamento compressivo, o solo, quando solicitado por uma tensão pode deformar até o estado elástico (recuperável) e se a tensão for maior que a sua capacidade de suporte, o solo deformará ao estado plástico (irrecuperável), a parcela do estado elástico está ligada a “memória de tensões” que o solo possui, ou seja, ao longo do tempo armazena em sua estrutura física todas as tensões a qual já foi submetido, seja ele por ação externa ou por processos naturais ao qual sofreu anteriormente (HOLTZ *et al.*, 2010).

Então as análises de compressibilidade, geram a possibilidade da avaliação desta “memória de tensões”, sendo esta uma variável utilizada em larga escala para determinar a capacidade de suporte do solo (ROSA, 2007 *apud* SAMPIETRO, 2013).

Buscando um grau de compactação do solo que aumente a produtividade e deixe o solo no estado ideal as plantas, faz-se necessário o estudo do comportamento físico-mecânico e a caracterização física deste recurso natural. Silva *et al.* (2010) menciona que existem outras propriedades físicas do solo que são utilizadas para identificar o seu estado de compactação, mas apenas os ensaios de compressibilidade geram a  $\sigma_p$ , que é uma variável determinadora que quantifica as tensões em (kPa) que podem ser exercidas sobre o solo deixando-o em seu estado elástico (recuperável), não ocasionando uma compactação adicional (irreversível) (FREITAS, 2015).

O índice de compressão ( $C_c$ ) é a segunda variável que se busca em um ensaio de compressibilidade, pois esta mensura a susceptibilidade do solo à compactação em uma relação entre a variação do índice de vazios por unidade de tensão aplicada, dando ênfase à porção das deformações plásticas (irrecuperáveis) do solo (SILVA *et al.*, 2000) *apud* SAMPIETRO, (2013).

Então avaliar a compressibilidade visando a qualidade física do solo é preponderante, e no teste temos valores distintos de pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), densidade do solo ( $\gamma_d$ ), além do índice de compressão ( $C_c$ ).

## 2.6 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO (PROCTOR)

O ensaio de compactação realizado em laboratório mais utilizado atualmente foi publicado em 1933 através do engenheiro Ralph R. Proctor, onde verificou-se que para a segurança e qualidade de aterros e barragens era necessária uma técnica construtiva que buscasse uma compactação eficiente, logo Proctor verificou que a compactação está diretamente ligada a: umidade, massa específico dos grãos do solo, energia de compactação e a classe textural do solo. (SOBREIRA *et al.*, 2018)

O ensaio difundiu-se como “Ensaio de *Proctor*”, e para realiza-lo é necessária a adição de umidades crescentes em no mínimo cinco amostras, mensurando uma parábola, o ponto central da parábola faz jus ao valor de  $U_{oc}$ , que preconiza o estado com o maior grau de compactação e densidade máxima do solo ( $\gamma_{dmáx}$ ), pois esta elimina toda a macroporosidade do solo, deixando apenas uma pequena porção de microporos conforme a aplicação da tensão repetidas vezes (VARGAS, 2021).

Esta análise preconiza compactar o solo no interior de um molde cilíndrico de 1000 cm<sup>3</sup> na energia normal (E.N.) com um soquete padronizado de 2500 g, na energia intermediária (E.I.) e modificada é usado um molde cilíndrico de 2085 cm<sup>3</sup> com um soquete padronizado de 4536 g, sendo aplicados os golpes referentes à energia escolhida no momento do ensaio. O quadro 3 explana bem as energias de compactação e a quantidade de golpes. (ABNT NBR 7182/2016).

Quadro 3 – Energias de compactação

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

Fonte: ABNT NBR 7182/2016.

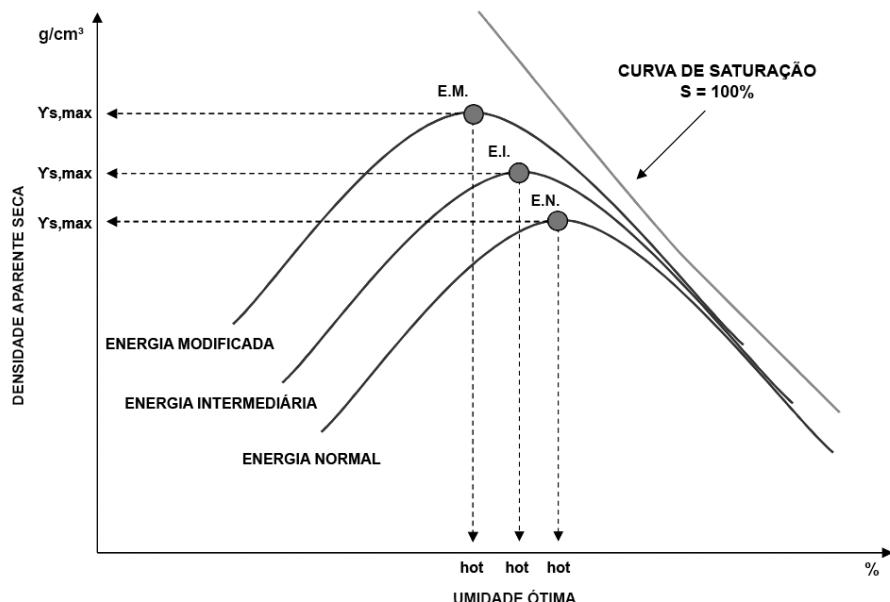
Cada amostra de solo é preparada de acordo com a (ABNT NBR 6457/2016), com o auxílio de uma peneira de 4,8mm o solo que passa é utilizado no ensaio de compactação, o ponto de friabilidade do solo geralmente está atrelado a proximidade da Uoc, estima-se uma umidade presumível de 5% abaixo da Uoc para realizar o primeiro ponto do ensaio, os pontos subsequentes serão adicionados cerca de 2% de umidade a mais utilizando água destilada.

Buscando uma curva com pontos mais secos, médios e úmidos, em cada amostra a mensuração da  $\gamma_d$  é realizado em função da umidade de moldagem de cada corpo de prova. Com o ensaio terminado plota-se um gráfico com a umidade (%) no eixo das abscissas e a  $\gamma_d$  no eixo das ordenadas.

Por intermédio do gráfico plotado é possível determinar uma equação quadrática que ao ser calculada remete a  $\gamma_{dmáx}$  e a Uoc, os ramos secos (a esquerda da Uoc) e úmidos (a direita da Uoc) também são plotados. (PINTO, 2006; MACHADO; LIMA; CARVALHO; 2013 *apud* VARGAS, 2021).

Geralmente conforme se aumenta a energia a Uoc fica menor, a figura 6 exemplifica como um gráfico de ensaio de compactação se comporta.

Figura 6 – Gráfico de compactação em três energias diferentes



Fonte: Adaptado de [www.suportesolos.com.br](http://www.suportesolos.com.br) (2023).

O comportamento no ensaio pode ser diferente conforme o tipo de solo, em solos arenosos cuja coesão é inexistente a umidade sempre será menor para alcançar

a Uoc, e em solos argilosos cuja coesão é alta sempre necessitará um maior teor de umidade para chegar na Uoc, estes solos quando em baixa umidade aumentam a sua resistência mecânica, pois o atrito e a coesão entre as partículas de solo conferem maior eficácia contra a deformação quando solicitado-o por tensões.

Adicionando maior umidade encontra-se a Uoc, pois a água reage com as partículas de solo dando-lhe maior coesão e reorientação das partículas, gerando um peso específico aparente seco maior e diminuindo a porosidade drasticamente, sendo a água e o ar impedido de ocupar espaço nestes poros. (DNIT, 2006).

Depois da Uoc se o teor de umidade aumentar o inverso predomina, pois, a água atua como agente incompressível, se o solo estiver muito saturado a compactação é afetada, pois a água fará um efeito de “mola” e não será expulsa dos poros do solo, porque o ar estará ao seu entorno, logo as partículas de solo não têm reorientação estrutural, tornando o peso específico aparente seco menor ao final do ensaio.

## 2.7 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR)

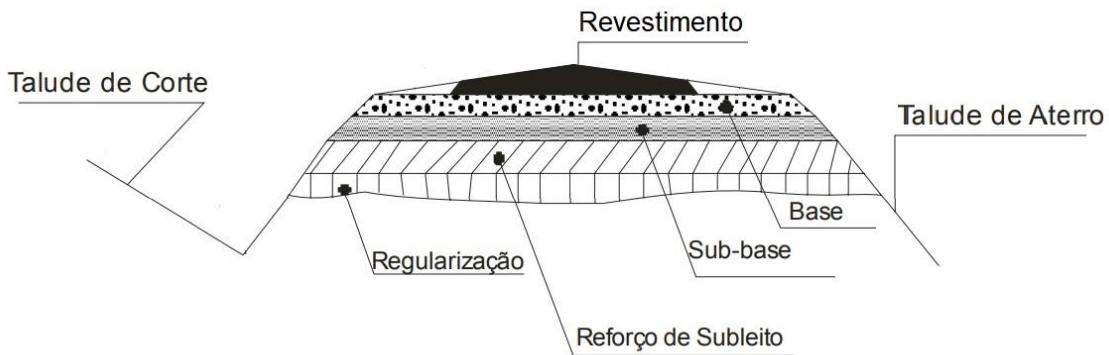
Este ensaio foi criado em 1938 pelo engenheiro americano O. J. Porter, onde deu início ao ensaio CBR, que tinha capacidade de aferir em laboratório a capacidade de suporte do solo a solicitações, depois o ensaio passou por melhorias e começou a ser usado pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE). (CARVALHO, 2005 *apud* SOKALSKI, 2021)

A normatização brasileira é a ABNT- NBR 9895/2016 – Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio e a Norma DNIT 172/2016 ME – Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio, o qual consiste em um ensaio de penetração em corpos de prova compactados pelo método apontado na ABNT-NBR 7182/2016 – Solo – Ensaio de compactação cujo objetivo principal é encontrar depois de compactado a maior resistência do solo por intermédio da energia escolhida utilizando 12 golpes por camada (5 ao todo) no cilindro para material que será trabalhado como subleito e 26 ou 55 golpes para material utilizado em sub-base e base, respectivamente (DNIT, 2016).

A utilização de diferentes energias gera resultados eficazes para a utilização em campo da estabilização mecânica dos solos, pois elas são proporcionais com a

quantidade de vezes que o solo é submetido ao rolo compactador pé de carneiro para chegar a  $\gamma_d$  exigida em projeto. A figura 7 demonstra como são dispostas as camadas de um pavimento:

Figura 7 – Camadas de um pavimento



Fonte: Adaptado [www.guiadaengenharia.com](http://www.guiadaengenharia.com) (2023).

O valor do CBR expresso em % juntamente com a Uoc do material ensaiado é usado nos dias atuais pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para o dimensionamento de pavimentos.

O ensaio CBR pode ser realizado com solo em seu estado natural ou com estrutura amolgada cujo objetivo é verificar se a resistência do solo é equiparada a resistência de uma brita graduada padrão, o valor de CBR é designado então em porcentagem. (SOKALSKI, 2021).

Para a determinação do CBR, o cilindro compactado é solicitado por uma prensa manual ou mecanizada, que por auxílio de um pistão contendo área de 19,36 cm<sup>2</sup> que penetra no solo a uma velocidade de 1,27mm/min, são efetuadas leituras entre 0,5 minutos (0,63mm) e 10 minutos (12,7mm), são consideradas para cálculo do CBR as leituras efetuadas a 2 minutos (2,54mm) e 4 minutos (5,08mm), dentre estes dois considera-se o maior valor de CBR. (CAPUTO, 1975 *apud* SOKALSKI, 2021).

Concomitantemente, o ensaio CBR avalia a expansão dos solos, pois os corpos de prova são saturados durante 96 horas, com auxílio de deflectômetros é medida a expansão a cada 24 horas cujo objetivo seria realizar uma simulação do pior cenário possível que este solo poderia enfrentar (chuvas de grande magnitude).

A expansão também pode ser analisada por outros métodos conhecidos na literatura (quadro 4). Os métodos diretos não foram testados nos solos retráteis, estes

podem trazer maiores respostas sobre o potencial expansivo que estes solos detêm.

Quadro 4 – Métodos diretos e indiretos de identificação de solos expansivos

MÉTODOS	SUB-DIVISÕES	CRITÉRIOS	REFERÊNCIAS
INDIRETOS	IDENTIFICATIVOS	Difração de raio X, Microscopia eletrônica de varredura, Análise termo-diferencial e Adsorção de etileno-glicol e glicerina.	AYALA et al. (1986)
		Físico-químicos	FINK et al. (1971)
	QUALITATIVOS	Granulometria, consistência e índices físicos e classificação geotécnica.	PRIKLONSKIJ (1952), SKEMPOM (1953), SEED et al. (1962), VAN DER MERWE (1964), CHEN (1965), VIJAYVERIYA e GHAZZALY (1973), RODRIGUES ORTIZ (1975), CUELLAR (1978).
		Geologia, geomorfologia, Pedologia e identificação visual.	PATRICK e SNETHEN (1976), AYALA et al. (1986), FERREIRA (1990c e 1993a).
DIRETOS	AVALIATIVOS	Ensaio de expansão de Lambe	LAMBE (1960)
	QUANTITATIVOS	Expansão livre e tensão de expansão Ensaios edométricos duplos e simples	SEED et al. (1962), CHEN (1965), VIJAYVERIYA e GHAZZALY (1973), RODRIGUEZ ORTIZ (1975), CUELLAR (1978), JIMENEZ SALAS (1980)
		Ensaios edométricos de sucção controlada.	ESCARIO (1967 e 1969), AITCHISON et al. (1973), JOHNSON (1978), McKEEN (1980).

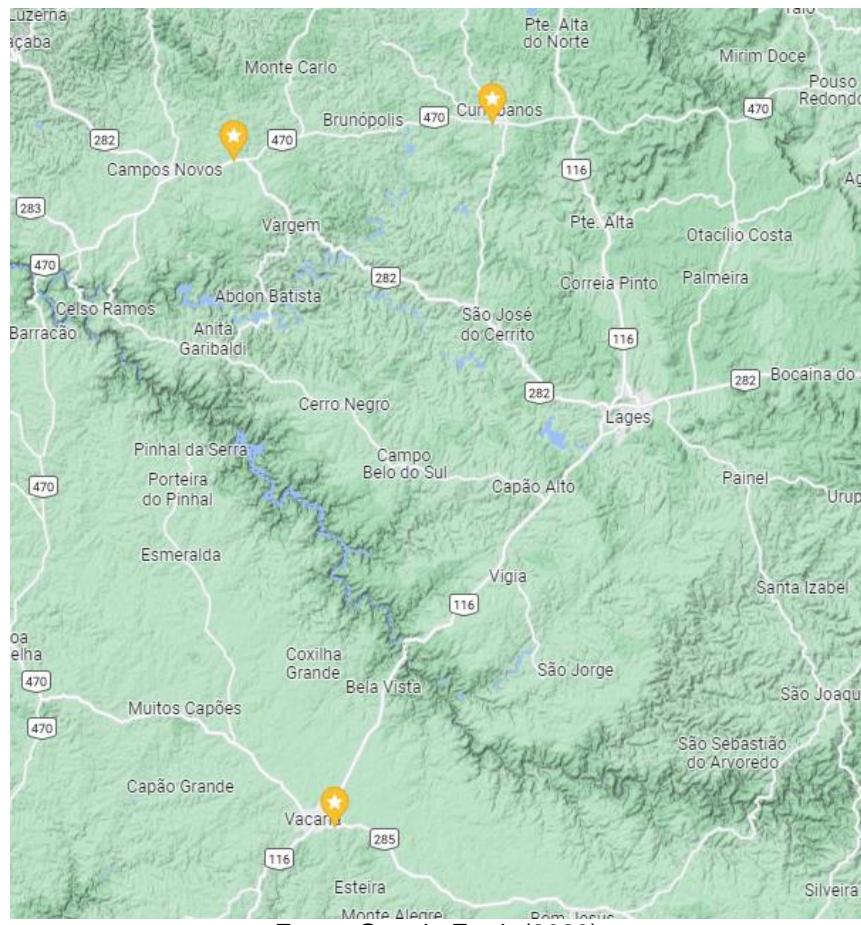
Fonte: SCHREINER *et al.*, (1987) *apud* SILVA (2018)

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

Para condução das análises os solos escolhidos que apresentam a retração estão localizados nos estados de SC e RS, solos estes estudados por Silva (2015; 2017; 2019) e Testoni (2015), foram demarcados pelos pontos amarelos na figura 8, sendo que cada solo tem menção a sua respectiva cidade na nomenclatura de cada solo.

Figura 8 – Localização dos solos em Santa Catarina e Rio Grande do Sul



Fonte: Google Earth (2023)

Na classificação pedológica os solos foram classificados da seguinte forma:

**Latossolo Bruno Distrófico Típico (LBVAC)** - Vacaria/RS - 28°30'47.40" S; 50°53'36.90" W; **Latossolo Vermelho Distrófico Retráctico (LVCN)** - Campos Novos/SC - 27°22'34.93" S 51°05'26.92" W; **Nitossolo Bruno Distrófico Húmico (NBCUR)** - Curitibanos/SC - 27°18'42"S 50°35'27"W.

Os solos foram coletados à beira das estradas em taludes de corte, com predominância de mata nativa. A classificação climática Köppen-Geiger para todos os solos é “Cfb” e segundo (Silva, 2019) os solos são classificados geologicamente de acordo com a Tabela 5:

Tabela 5 – Geologia predominante dos solos

Identificação	Litologia	Formação Geológica	Cronologia	Altitude	Relevo Local	Vegetação Primária
		Grupo	Formação			
<b>LBVAC</b>	Basalto	São Bento	Serra Geral	Jurássico - Cretáceo	1000m	Suave ondulado
<b>LVCN</b>	Basalto	São Bento	Serra Geral	Jurássico - Triássico	939m	Suave ondulado
<b>NBCUR</b>	Basalto	São Bento	Serra Geral	Jurássico - Cretáceo	1018m	Suave ondulado

Fonte: EMBRAPA (2000); Santa Catarina (2008); *apud* Silva (2019).

A classificação geológica detalhada está exposta no quadro 5:

Quadro 5 – Classificação Geológica dos Solos

Classificação Geológica		
Fáceis Paranapanema (K1βpr)	Formação Campos Novos (K1βcn)	Formação Gramado (K1βgr)
Vacaria	Campos Novos	Curitibanos
Derrames basálticos granulares finos, melanocráticos, contendo horizontes vesiculares espessos preenchidos por quartzo (ametista), zeolitas, carbonatos, celadonita, Cu nativo e barita, compreende a maior concentração das jazidas de ametista do estado.	Basaltos, microgranulares, textura microgranular, predominantemente pretos; comuns vesículas milí a centimétricas com opala preta e água, eventual presença de Cu nativo, alteração amarelo ovo (jarosita) característica.	Derrames basálticos onde predominam formas de lóbulos, melanocráticos cinza; horizontes vesiculares espessos e abundantes onde predominam zeolitas, carbonatos, apofilita e saponita, estruturas de fluxo e pahoehoe; intercalações frequentes com rochas sedimentares eólicas (intertrápicas) da Formação Botucatu.

Fonte: CPRM (2000; 2014)

O boletim meteorológico (2022) de Vacaria está disposto no anexo D. Segundo a EMBRAPA em 2022 a precipitação anual em Vacaria foi de 1898,4 mm.

Segundo a EPAGRI/CIRAM no ano de 2022 a precipitação anual em Campos Novos foi de 2269,2 mm e em Curitibanos foi de 2225,8 mm caracterizando em alguns meses a máxima precipitação já alcançada.

A figura 9 demonstra como o perfil do Nitossolo Bruno de Curitibanos encontrava-se a campo:

Figura 9 – Perfil do solo NBCUR com mata nativa



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Maiores informações sobre os solos encontram-se nos anexos A, B e C, onde a descrição morfológica detalhada de cada solo é apresentada.

Segundo Testoni (2015), os solos objeto de estudo apresentam a seguinte configuração mineralógica conforme o quadro 6, onde percebe-se que os solos têm origem caulinítica, este mineral não apresenta comportamento expansivo, portanto pode-se inferir que a retração está relacionada a quantidade de C-E presente nos solos, pois a esmectita tem potencial expansivo maior que a caulinita.

Quadro 6 - Valores percentuais dos minerais que compõem as amostras, estimados por software

SOLO	HORIZONTE	2:1 HE	CAULINITA		C-E
			% -----		
LBVAC	A	26	43	31	
	B	23	39	38	
LVCN	A	22	41	37	
	B	20	40	40	
NBCUR	A	20	40	40	
	B	16	41	43	

Fonte: Testoni (2015).

C-E = Interestratificados de caulinita-esmectita; 2:1 HE = Argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas

Segundo Silva (2015), foram realizadas análises granulométricas e quantificada a matéria orgânica do solo (MOS) e a Dp conforme a tabela 6:

Tabela 6 – Granulometria dos Solos

Solo	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Textura	MOS (g dm <sup>-3</sup> )	Dp (g/cm <sup>3</sup> )
LBVAC HA	59,4	30,4	10,2	Argilosa	65,58	2,65
LBVAC HB	65,3	26,2	8,4	Muito Argilosa	48,69	2,60
LVCN HA	57,7	31,1	13,2	Argilosa	40,35	2,72
LVCN HB	59,5	23,4	17,1	Argilosa	27,96	2,50
NBCUR HA	59,5	33,9	6,6	Argilosa	57,61	2,44
NBCUR HB	69	24,2	6,8	Muito Argilosa	31,11	2,93

Fonte: Silva (2015).

A tabela 7 descreve os testes de retração executados por Silva (2015; 2019), apesar do método do mercúrio metálico não ter mais respaldo pela ABNT, é um método ainda utilizado para verificar a contração/retração, estes valores foram usados na correlação disposta no apêndice B.

Tabela 7 – Índice de retração dos solos

SOLO E HORIZONTE	Retração dos solos					
	IR-C		IR-M (%)	IR-A	IR-T (%)	
	35°C	60°C	105°C	105°C	105°C	105°C
<b>LBVAC HA</b>	0,15	0,22	0,22	0,27	0,11	47
<b>LBVAC HB</b>	0,19	0,24	0,24	0,26	0,08	29
<b>LVCN HA</b>	0,16	0,14	0,14	0,22	0,06	24
<b>LVCN HB</b>	0,18	0,17	0,17	0,25	0,07	20
<b>NBCUR HA</b>	0,14	0,22	0,22	0,27	0,10	37
<b>NBCUR HB</b>	0,14	0,20	0,20	0,28	0,08	39

Fonte: Silva (2015; 2019).

Onde IR-C: Retração dos solos através do Método da Seringa – COLE mod (SCHAFFER & SINGER, 1976), IR-M: Método do Mercúrio Metálico (HALUSCHAK, 2006), IR-A: Método do Preenchimento do Anel com Areia (Silva, 2015) e IR-T: Retração dos solos com o aumento da sucção matricial de água durante a curva de secagem do solo (Silva, 2019).

### 3.2 ANÁLISES REALIZADAS

Para conhecer os solos estudados, foi necessário realizar alguns ensaios e análises de caracterização física como: Limites de consistência, compressibilidade, compactação e índice de suporte Califórnia.

Para realizar os ensaios foram coletados os horizontes A (10 a 15 cm) e B (de acordo com as profundidades do HB de cada solo expostas na classificação pedológica disposta nos anexos A, B e C). O solo com estrutura indeformada (240 anéis) foi coletado para as análises de compressibilidade e o solo com estrutura amolgada (cerca de 75 kg de cada horizonte) para as outras análises. As coordenadas foram retiradas de pontos ao lado da rodovia, próximo aos taludes onde foram coletadas as amostras.

#### 3.2.1 LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Os “Limites de Atterberg” foram descritos segundo a ABNT-NBR 6459:2016 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez e ABNT-NBR 7180:2016 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.

Para encontrar o LL usa-se o aparelho de Casagrande, onde depois de revolver

o solo com crescentes umidades, molda-o na concha do aparelho com o intuito de criar uma fenda centralizada com auxílio do cinzel, verifica-se a altura do solo e procede os golpes, quando a fenda se encontrar aos 25 golpes da concha, define-se este sendo o LL.

Na determinação do LL a temperatura ambiente foi controlada e o solo usado foi o mesmo usado para o LP, porém com um teor de umidade maior. O número de golpes correspondente a 25 determina o LL do solo, porém foram realizados diversos pontos com umidades maiores e menores, a fim de se obter um  $R^2$  acima de 0,8 e determinar melhor o LL pela equação obtida nos gráficos.

A mensuração do LP é através do revolvimento do solo com água destilada até chegar no estado plástico e com auxílio de uma placa de vidro rola-se o solo até obter um formato cilíndrico fragmentando-se na ordem de 100 mm de comprimento e 3 mm de diâmetro, onde o uso do gabarito inoxidável é indispensável a comparação.

Para determinação assertiva do LP foram realizadas diversas repetições a fim de se obter ao menos três pontos e nenhum deles diferir da respectiva média um valor maior que 5% desta média.

Após a coleta das amostras para determinação do teor de umidade obtém-se os valores de LP e LL, onde a plotagem em um gráfico determina a equação e o  $R^2$  dos valores de LL, mensurando assim os resultados chegamos ao valor do IP.

Através dos dados obtidos de LL e LP determinou-se o IP, expresso conforme a fórmula (3) a seguir:

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

Após calculados os valores de IP, e determinado a porcentagem de argila em cada solo, foi calculado a atividade da argila por intermédio da equação (4):

$$A = \frac{IP(\%)}{\text{Argila} (\%)} \quad (4)$$

A = Atividade da Argila; IP = Índice de Plasticidade.

Quando os valores de limite de consistência e atividade da argila são determinados, é prosseguida com a classificação dos solos perante os dois modelos amplamente utilizados: O *Transportation Research Board* (TRB) regido pela norma D2487-17 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e o *Unified Soil*

*Classification* (USCS) que integra o documento M 145 da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

Logo após cada solo é avaliado perante a carta de plasticidade de Casagrande, a carta de plasticidade com foco na mineralogia e a classificação de expansibilidade de argilominerais e materiais argilosos.

### 3.2.2 COMPRESSIBILIDADE

No total foram coletados 240 cilindros metálicos de 6,11 cm de diâmetro interno e 2,5 cm de altura para os testes de compressibilidade, as amostras contavam com estrutura preservada em cada perfil de solo, no total de 80 amostras, sendo 40 do horizonte A na profundidade de 10 a 12 cm do topo do horizonte, e 40 do horizonte B nas respectivas profundidades conforme a descrição nos anexos A, B e C.

Os 240 anéis coletados foram para o acondicionamento, visando manter a estrutura indeformada com o menor nível de perturbação possível, foram usados papel filme e papel alumínio em volta da amostra que tinha cerca de 1 cm acima e 1 cm abaixo do anel transpassando solo, depois de envolto as amostras foram acondicionadas em um reservatório metálico onde o mesmo era preenchido com solo nas laterais para evitar o amolgamento no transporte.

No laboratório as amostras foram mantidas na geladeira e posteriormente submetidas a seleção rigorosa, onde cada cilindro teve sua marcação devida previamente com uso de caneta permanente a fim de não atrapalhar na execução do ensaio, visto que o consolidômetro tem suas peças fabricadas milimetricamente.

Com o auxílio de um estilete foi realizado o “toalete” das amostras, onde foram descartadas muitas amostras que apresentavam atividade biológica, raízes grandes, saprólitos, buracos, etc.

No final o N característico de cada solo ficou o seguinte: LBVAC ( $N = 79$ ), LVCN ( $N = 40$ ) e NBCUR ( $N = 48$ ).

Depois de realizado o “toalete”, conforme a figura 10, as amostras foram pesadas, e então preparadas com um tule e elástico e novamente pesadas, logo após as amostras foram saturadas por capilaridade durante 96h, e em seguida pesadas novamente e, então, separadas por grupos de 5 amostras no mínimo, e equilibradas em quatro sucções matriciais, a saber: 6 kPa (mesa de tensão), 100 kPa e 500 kPa (Câmaras de Richards) e  $> 500$  kPa (secas ao ar).

Para cada sucção foram submetidas 5 amostras do horizonte A e 5 amostras do horizonte B de cada perfil no mínimo, dessa forma depois que as amostras ficaram dias expostas nas sucções mátricas correspondentes elas se equilibraram, então foram pesadas para determinar a  $\gamma_d$  e a  $\theta_v$ .

Figura 10 – Amostras depois do “toalete” sendo saturadas por capilaridade



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Logo após foram acondicionadas em temperatura ambiente com um papel filme cobrindo a bandeja das amostras antes do teste de compressibilidade para evitar a perca de umidade por evaporação, depois foram retirados os tules e os elásticos dos anéis metálicos e realizada as verificações com paquímetro das medidas do corpo de prova, e então acondicionar as amostras no consolidômetro e realizar o teste de compressibilidade que consiste na aplicação de sete diferentes tensões crescentes (25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa) sem cessar por no mínimo 4 minutos em cada tensão, obtendo parâmetros do teste de compressão uniaxial.

Todas as amostras foram submetidas aos ensaios de compressibilidade usando o consolidômetro automático com interface IHM (SILVA *et al.*, 2015). As cargas sucessivas e estáticas aplicadas tiveram auxílio de pressão por meio de ar comprimido. Cada carga aplicada é estipulada para durar no mínimo 4 minutos e no máximo 15 minutos, pois, de acordo com Silva *et al.*, (2007), mais de 99 % da compactação é alcançada nesse tempo de aplicação da carga.

Maiores detalhes sobre o equipamento estão na figura 11:

Figura 11 - Consolidômetro automatizado com IHM incorporada



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Após o término do ensaio as amostras são submetidas a secagem total durante 48h a 105 °C em estufa controlada, depois as amostras são pesadas para o cálculo da  $\gamma_d$ .

Para a mensuração da  $\sigma_p$  e Cc neste trabalho foi optado o método proposto por GUBIANI, P.I. et al., (2017), que por intermédio de um VBA do excel o cálculo e a plotagem das curvas de compressão fornecem dados mais confiáveis seguindo o método do Casagrande (1936), determinando ainda variáveis sobre o índice de vazios,  $\gamma_d$ ,  $\sigma_p$  e Cc. Este modelo tinha o foco de estimar modelos matemáticos com a mesma eficiência em 347 curvas de compressão.

Para o cálculo da PT o modelo segue a equação de Van Genutchen (1980), que tem embasamento físico.

### 3.2.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO (PROCTOR)

O ensaio de compactação teve execução precedida pelos métodos da ABNT-NBR 6457/2016 - Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização e da ABNT-NBR 7182/2016 - Ensaio de compactação.

Foram coletados cerca de 30 kg de cada horizonte de solo para os ensaios na

energia normal, intermediária e modificada, onde usou-se o cilindro pequeno nas três ocasiões sem reuso de material e cada solo teve o mínimo de 5 repetições a fim de se obter uma curva precisa da compactação.

Após a coleta, os solos alcançaram a umidade higroscópica (5 a 9%), e então foram submetidos ao peneiramento em malha de 4,8 mm, e separados em sacos plásticos de 2 kg para cada corpo de prova. Na energia normal o equipamento tinha funcionalidade automática, logo o processo foi mais rápido, onde as amostras foram umedecidas com água destilada até chegar próximo ao ponto de friabilidade.

Foram realizados vários pontos com umidades crescentes com cerca de 50 ml a mais em cada corpo de prova, na energia normal o soquete era pequeno e contou com 3 camadas de solo com 26 golpes em cada uma.

Quando o teste terminava, o solo que transpassava a parte superior do cilindro era retirado, e pelo volume do cilindro conhecido, determinava-se a massa úmida do solo compactado, onde pesava-se o conjunto de solo úmido e cilindro.

Logo após o cilindro foi acoplado em um macaco hidráulico, pois a retirada do solo compactado tinha maior rapidez e praticidade, determinando assim o teor de umidade da moldagem, ou seja, o solo compactado era partido ao meio e retirada uma amostra de solo do centro do corpo de prova e levada a estufa controlada a 105 °C por no mínimo 24 horas.

Para determinar a  $\gamma_d$  de cada corpo de prova, foi utilizada a equação (5):

$$\gamma_d = \frac{Mw \times 100}{V(100 + W)} \quad (5)$$

onde:

$\gamma_d$  é a densidade do solo, expressa em gramas por centímetro cúbico ( $g/cm^3$ );

$Mw$  é a massa úmida do solo compactado, expressa em gramas (g);

$V$  é o volume útil do molde cilíndrico, expresso em centímetros cúbicos ( $cm^3$ );

$W$  é o teor de umidade do solo compactado, expresso em porcentagem (%).

Com os teores de umidade determinados, foram plotadas as curvas de compactação, em parábolas, onde manteve-se as umidades nas abscissas e  $\gamma_d$  nas ordenadas, a norma não menciona que necessita ajustar as curvas a equações quadráticas, mas neste trabalho foi realizada, a fim de se obter a  $U_{oc}$  e a  $\gamma_{dmáx}$ .

Com as equações de cada curva determina-se a  $U_{oc}$  e a  $\gamma_{dmáx}$ , onde cada equação quadrática obtida tinha a seguinte forma:  $ax^2 + bx + c = 0$ , então a  $U_{oc}$  e a  $\gamma_{dmáx}$  foram determinadas seguindo as fórmulas (6) e (7):

$$U_{oc} \left( g/g^{-1} \right) = \frac{-b}{2a} \quad (6)$$

$$\gamma_{dmáx} \left( g/cm^3 \right) = \frac{-(b^2 - 4ac)}{4a} \quad (7)$$

O processo na E.I. e modificada, foram os mesmos, porém os ensaios foram realizados manualmente com o soquete grande. Na E.I. foram realizados 21 golpes em cada uma das 3 camadas de solo, e na energia modificada (E.M.) foram realizados 27 golpes em cada uma das 5 camadas de solo, conforme a figura 12.

Figura 12 – Execução do ensaio de compactação



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Após a determinação das curvas de compactação nas três energias, foi determinado o grau de compactabilidade, que expressa o incremento em % da  $\gamma_{dmáx}$  de uma curva em relação a outra, demonstrando se há grande diferença ou não conforme o incremento de energia.

O grau de compactabilidade é expresso a seguir, onde os dois valores de  $\gamma_{dmáx}$  são diferenciados de acordo com as duas energias de compactação que serão

correlacionadas, conforme a fórmula (8):

$$\text{Grau de compactibilidade (\%)} = 1 - \left( \frac{\gamma_{dmáx}}{\gamma_{dmáx}} \right) \times 100 \quad (8)$$

### 3.2.4 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR)

Todos os ensaios de CBR foram realizados na energia intermediária, simulando uma energia para uso do solo compactado em uma sub-base de pavimento. Duas normas foram utilizadas para auxiliar no processo a ABNT-NBR 9895/2016 – Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio e a Norma DNIT 172/2016 ME – Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio.

Para determinação do CBR foram coletados cerca de 30 kg de cada horizonte dos solos retráteis, onde empregou-se o uso do cilindro grande para todas as análises, as amostras alcançaram a umidade higroscópica (5 a 9%) e então foram coletadas cerca de 100g de cada solo e submetidas ao teste de umidade na estufa por 24 horas antes do ensaio, neste período as amostras ficaram acondicionadas em sacos plásticos evitando a evapotranspiração e erros na determinação da umidade.

A Uoc obtida no ensaio de compactação anteriormente foi usada como ponto de referência para o CBR, ou seja, foram determinadas umidades entre 2 a 3% menores e maiores que a Uoc, para obter-se uma curva eficaz.

Para solos argilosos foi visto que 5 kg de solo era suficiente para cada corpo de prova na umidade higroscópica, e para alcançar a Uoc necessitaria adicionar água destilada, onde o método de cálculo seguiu as fórmulas (9) e (10):

$$\text{P.A.S. (g)} = \frac{(\text{Peso da amostra na umidade higroscópica (g)})}{(\text{Teor de Umidade Médio (\%)}+100)} \times 100 \quad (9)$$

Onde: P.A.S. é o peso da amostra seca.

$$\text{Peso amostra umidade ótima (g)} = \frac{(\text{Peso da amostra seca (g)} \times (\text{Uoc (\%)}+100))}{100} \quad (10)$$

Então a partir destes valores obtém-se os valores teóricos de água (ml) a alcançar, e posteriormente é adicionado um valor referente a evaporação por conta do manuseio do solo com as mãos e também por causa da temperatura ambiente, conforme as fórmulas (11) e (12):

$$\text{Água Teórica (ml)} = \text{Peso amos. umid. ót. (g)} - \text{Peso amos. na umid. hig. (g)} \quad (11)$$

$$\text{Evaporação (ml)} = \frac{(\text{Peso da amostra seca (g)} \times 0,5)}{100} \quad (12)$$

A água destilada (ml) a adicionar na amostra é determinada pela soma da água teórica com a evaporação.

O material utilizado não apresentava reuso, e o ensaio preconizou que cada curva obtivesse no mínimo um ponto no ramo seco, um no ramo ótimo e um no ramo úmido. Alguns solos obtiveram até 5 pontos em cada curva. Os cilindros foram pré pesados, e medidos tanto sua altura como diâmetro para posterior cálculo do volume do cilindro.

Na preparação do cilindro, o uso do disco espaçador em seu interior foi utilizado, tendo sua altura determinada para posteriormente ser descontada da altura do molde cilíndrico. O uso de papel filtro fez-se presente tanto na parte inferior quanto na superior do disco espaçador.

Após a preparação do cilindro a adição de água destilada no solo até chegar ao teor de umidade preconizado foi realizada, o solo foi revolvido e homogeneizado e então foi submetido a energia intermediária de compactação (26 golpes em cada uma das 5 camadas de solo).

Diferentemente do ensaio de Proctor, o teor de umidade da moldagem é feito com uma porção de 100g do solo que foi retirado da bandeja e levado por no mínimo a 24h em estufa controlada a 105 °C.

Para determinar a densidade do solo de cada corpo de prova, foi utilizada a equação (13):

$$\gamma_d = \frac{M_w \times 100}{V(100 + W)} \quad (13)$$

onde:

$\gamma_d$  é a densidade do solo, expressa em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ );

$M_w$  é a massa úmida do solo compactado, expressa em gramas (g);

$V$  é o volume útil do molde cilíndrico, expresso em centímetros cúbicos ( $\text{cm}^3$ );

$W$  é o teor de umidade do solo compactado, expresso em porcentagem (%).

Com os cilindros compactados, estes foram virados de cabeça para baixo, adicionado papel filtro e a haste de expansão com prato perfurado, e acondicionados dois discos anelares no lugar do disco espaçador, de massa total próxima a 4540 g.

Logo após foi apoiada a haste do deflectômetro, e o relógio comparador na parte superior do cilindro. Todos os relógios foram estabilizados no ponto 0, e então

os cilindros foram para câmara de imersão durante 96 horas para averiguar a expansão do solo.

As leituras das expansões foram realizadas a cada 24 horas e o cálculo procedeu de acordo com a fórmula (14):

$$\text{Expansão (\%)} = \frac{(\text{Leitura Final} - \text{Leitura Inicial do relógio comparador})}{(\text{Altura Inicial do Corpo de Prova})} \times 100 \quad (14)$$

Após os quatro dias, os cilindros foram retirados da câmara de imersão e ficaram drenando por no mínimo 10 minutos, antes de serem submetidos a penetração. A prensa de CBR (figura 13) é automática e foi submetida a uma rigorosa calibração antes dos ensaios, as leituras do CBR foram realizadas a cada 30 segundos até 4 minutos após a exposição a prensa, e depois de um minuto até os 5 minutos.

Figura 13 – Corpo de prova compactado sendo rompido na prensa CBR



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para o resultado do CBR, foram adotados os maiores valores obtidos entre as penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm (2 e 4 minutos), respectivamente.

Para determinar a pressão corrigida foi usada a fórmula (15):

$$\text{Pressão Corrigida} = \frac{(\text{Leitura do Deflectômetro da Prensa})}{(\text{Área do Pistão})} \quad (15)$$

A fórmula (16), foi usada para o cálculo do índice de suporte Califórnia.

$$\text{CBR (\%)} = \frac{(\text{Pressão Calculada ou Pressão Corrigida})}{(\text{Pressão-padrão})} \times 100 \quad (16)$$

A pressão-padrão refere-se a constantes normativas referentes a uma brita graduada padrão com CBR de 100%.

### 3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O delineamento foi inteiramente casualizado, e os resultados da compressibilidade ( $\sigma_p$  e  $C_c$ ) foram submetidos ao teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov) e homogeneidade das variâncias (Bartlet), as análises de variância (horizonte, umidade, horizonte x umidade). Foram realizados o teste de comparação múltipla (Holm-Sidak), a análise de correlação de Pearson (dados paramétricos) ou Spearman (não paramétricos) e a Regressão múltipla linear (Stepwise) e não linear (Marquardt). Para um melhor ajuste foram retirados dos modelos os *outliers* e na modelagem da  $\sigma_p$  o método de Buscher (1990) foi utilizado, com ajuste de forma por regressão não linear.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Em geral, os solos apresentaram um LP acima dos 40% (tabela 8) e o solo que apresentou maior LP e LL foi o LBVAC HB (56,81 e 66,81% respectivamente). Todos os LP encontrados foram similares variando de 40,01 a 42,73% nos solos retráteis, e apenas o LBVAC HB apresentou valor superior (56,81%) fato este está atrelado à grande percentagem de argila que este solo apresenta.

Tabela 8 – Limites de Consistência dos Solos e Atividade da Argila

<b>Tipo de Solo</b>	<b>LP (%)</b>	<b>LL (%)</b>	<b>IP (%)</b>	<b>ATIVIDADE</b>
<b>LBVAC HA</b>	42,73	54,12	11,39	0,19
<b>LBVAC HB</b>	56,81	66,81	10,01	0,15
<b>LVCN HA</b>	40,37	54,29	13,92	0,24
<b>LVCN HB</b>	40,66	59,92	19,26	0,32
<b>NBCUR HA</b>	40,01	53,46	13,44	0,22
<b>NBCUR HB</b>	41,16	53,39	12,23	0,17

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O IP teve variação de 10,01 a 19,26%, onde o maior valor encontrado foi no LVCN HB, solo este que apresenta coloração vermelha e consequentemente uma melhor percolação da água.

Todos os solos apresentaram valores similares de LL com exceção do LBVAC HB e LVCN HB que apresentaram uma maior umidade para o solo se comportar como fluído. O melhor ajuste do  $R^2$  foi encontrado no LVCN HA (0,976) e o menor ajuste foi encontrado no LBVAC HA (0,733)(apêndice C).

Os limites de consistência dos solos estudados se aproximaram de valores explanados por Silva (2019) que encontrou variação do LL entre 53 a 60%, do LP de 43 a 52% e do IP de 8 a 13%, onde o LBVAC apresentou maior LL e LP, característica esta similar ao encontrado neste trabalho.

Luciano *et al.*, (2012), estudando Nitossolos Brunos de Santa Catarina, obteve LL médio de 54% similarmente ao encontrado no NBCUR deste trabalho (53,36 a 53,46%).

O comportamento encontrado no NBCUR tem muita semelhança com o

encontrado no LBVAC e LVCN ambos no HA. E entre os horizontes os resultados de LL e LP são próximos, enfatizando que a consistência do solo não tende a modificar em profundidade neste solo.

O maior IP = 19,26% foi encontrado no LVCN HB, apesar do valor mais alto este ainda se encontra na faixa de solos com média plasticidade, dando ênfase que este solo a partir do LP tem um espaço maior para reter umidade antes de entrar no estado fluído.

Não sabemos sobre o comportamento expansivo que existe nos solos retráteis, então como foram avaliadas as expansões nos ensaios CBR, foi utilizada algumas analogias da literatura que contemplam solos potencialmente expansivos.

Após obtermos os enquadramentos da atividade de todos os solos cuja característica de argila inativa corrobora com os trabalhos feitos por outros autores no Brasil, Varela (2021), enfatiza que nos estudos com solos expansíveis no Brasil cerca de 86% apresentaram atividade da argila inativa, porém valores variando de 0,30 até 0,90 demonstrando que os valores encontrados neste trabalho são relativamente baixos variando de 0,15 a 0,32.

De acordo com os valores obtidos podemos chegar a classificação universal dos solos pelos métodos adotados no *Transportation Research Board* (TRB) e *Unified Soil Classification System* (USCS), ou seja, a partir dos parâmetros físicos do solo encontramos indícios do comportamento deste (tabela 9).

Tabela 9 – Classificação TRB e USCS

<b>SOLO</b>	<b>TRB</b>	<b>USCS</b>
LBVAC HA	A-7-5	OH
LBVAC HB	A-7-5	OH
LVCN HA	A-7-5	OH
LVCN HB	A-7-5	OH
NBCUR HA	A-7-5	OH
NBCUR HB	A-7-5	OH

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

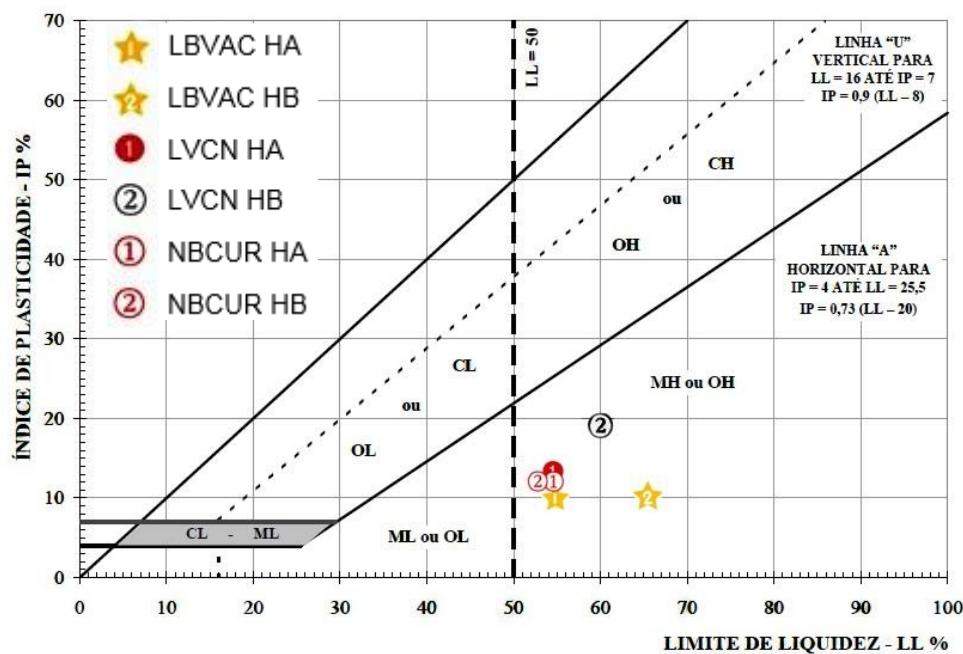
No sistema TRB os solos avaliados foram classificados como A-7-5, pois mais de 36% do solo passa pela peneira Nº 200 caracterizando-o em material silto-argiloso, após a verificação do  $LL > 40\%$  e  $IP > 10\%$  em todos os solos, o procedimento se deu a partir da relação de  $IP \leq LL - 30$  para classificação dos solos em A-7-5, o que se apresentou em todos os horizontes, classificando o comportamento do solo sendo

sofrível a mau se usado como subleito.

No sistema de classificação USCS todos os solos foram classificados em OH (*Organic High Compressibility*) dando ênfase a um material orgânico com alta compressibilidade, a tabela se refere a materiais contendo siltos e argilas com  $LL > 50\%$  e a versão final da classificação seria OH: argilas orgânicas de alta e média plasticidade.

A figura 14 contém a carta de plasticidade de Casagrande, onde é atrelado os limites de consistência dos solos para a verificação da sua classificação, resultando em todos os solos estudados a classificação MH ou OH, similar ao encontrado pela classificação USCS.

Figura 14 – Carta de Plasticidade de Casagrande



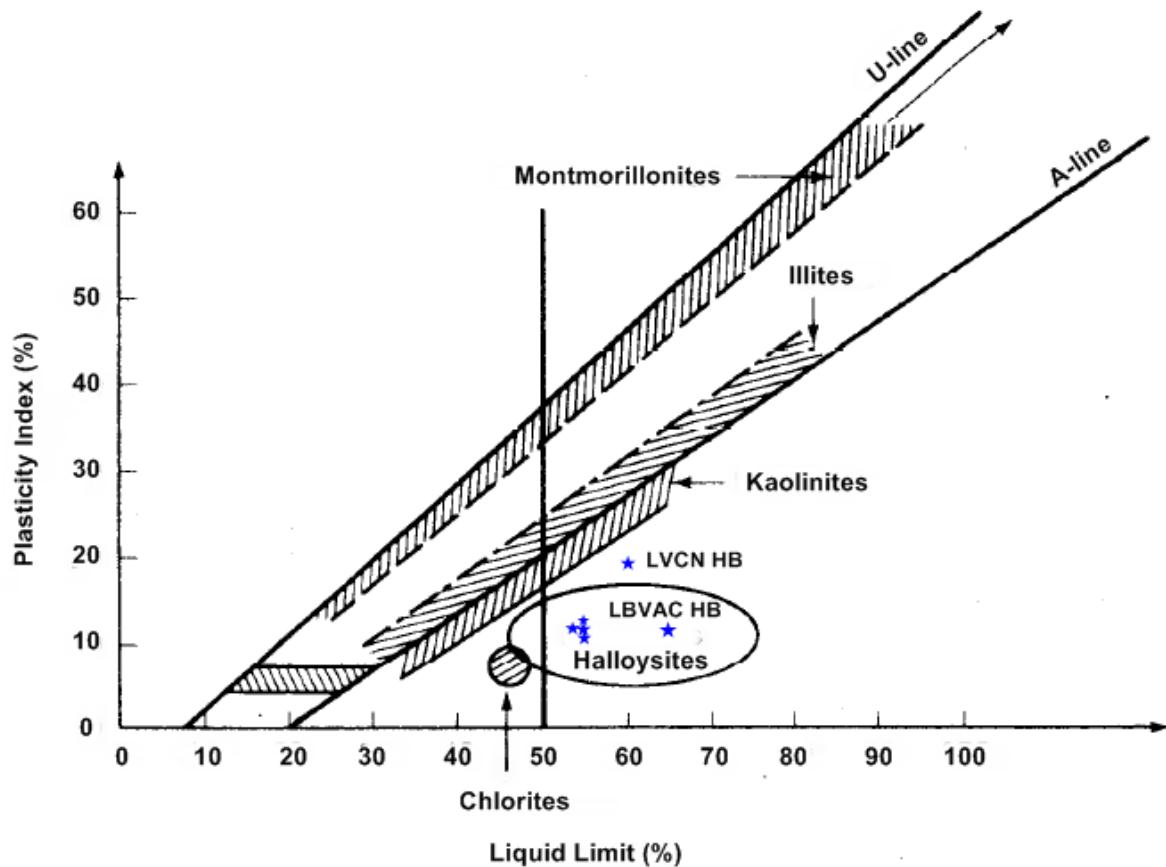
Fonte: Casagrande, (1932). Modificado pelo autor

Os métodos de classificação adotados na *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e *Unified Soil Classification System* (USCS) consideram os solos potencialmente expansivos alocados nas classificações A-6 e A-7 na AASHTO e CL e CH na USCS (PEREIRA, 2004).

A classificação dos solos por intermédio da mineralogia é descrita por Casagrande (1948), pois em sua carta de plasticidade existe uma menção gráfica a composição mineralógica dos solos, ou seja, enfatizam o comportamento de alguns solos no mundo, os solos com caráter retrátil estariam na zona das haloisitas (figura

15), fato este que não foi comprovado nas análises mineralógicas, pois os solos objeto de estudo apresentam mineralogia caulinítica, filossilicatos de camada 2:1 e interestratificados caulinita-esmectita que faz jus a propriedades de contração/expansão, porém limitadas pela presença dos polímeros hidróxi-Al entrecamadas (Testoni, 2015).

Figura 15 – Carta de Plasticidade de Casagrande com foco na mineralogia dos solos



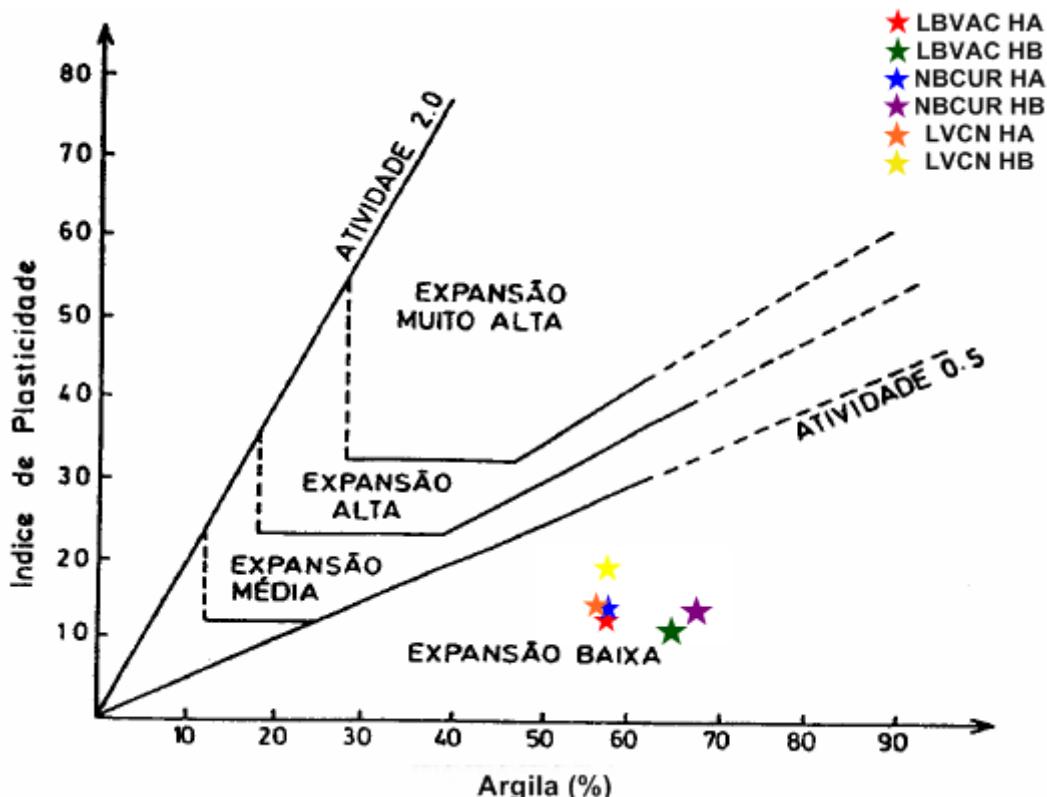
Fonte: Casagrande (1948). Modificado pelo autor

Os solos retráteis ficam logo abaixo da linha predominante dos solos cauliníticos, e também fica longe dos solos com predominância de uma das classes da esmectita (montmorilonita), que é um argilomineral altamente expansível, a linha-U no gráfico indica a porção dos solos mais expansíveis que existem, isso denota que a retração e expansão presentes nos solos objeto de estudo não é tão expressiva quanto em alguns solos que existem pelo mundo, e que a classificação perante ao modelo americano não mostrou eficácia nos solos subtropicais do Brasil.

Outra classificação muito utilizada está exposta na figura 16, correlacionando a percentagem de argila e o índice de plasticidade dos solos com intermédio da

atividade da argila e as linhas de expansão, como marcado os solos subtropicais estão na classe de expansão baixa e com atividade de Skempton < 0,5.

Figura 16 - Classificação de expansibilidade de argilominerais e materiais argilosos



Fonte: WILLIAMS & DONALDSON, (1980) *apud* PEREIRA, (2004) Modificado pelo autor.

Solos retráteis e expansivos, geralmente são retirados de locais onde serão construídas infraestruturas, por intermédio de um corte de talude onde são conduzidos a um bota fora.

Buscando entender o comportamento destes solos, deve-se realizar ensaios para avaliar as curvas de umedecimento, pois Silva, (2019) verificou as curvas de secagem para quantificar a retração/contração, todavia o processo de expansão por meio do umedecimento após a secagem não foi realizado.

A histerese pode ser observada por intermédio dessas curvas, Fredlung *et al.*, (1994) verificaram que após a secagem e o umedecimento o solo não conseguiu voltar ao estado de umidade anterior, ou seja, cria-se um espaço entre as curvas de secagem e umedecimento, onde pode-se ter infinitos pontos de umidade entre elas.

Portanto a histerese é totalmente relacionada com a temperatura e o clima do local, pois a maioria dos solos expansivos encontrados no Brasil localizam-se onde a evapotranspiração excede a precipitação, então quanto mais o solo seca e umedecer

ele apresentará uma curva característica (curva de retenção) diferente ao encontrado antes.

Para predizer os efeitos da histerese nestes solos e ainda avaliar a expansão é necessária a condução das curvas de secagem e umedecimento, bem como os ensaios elencados na fundamentação teórica.

#### 4.2 COMPRESSIBILIDADE

Pela textura dos solos infere-se que se apresentar textura arenosa, o mesmo não tem coesão e sua compressibilidade é rápida, se o solo apresentar textura argilosa o mesmo apresenta grande coesão e compressibilidade lenta.

A  $\gamma_d$  média de todos os solos são similares e os maiores valores foram encontrados no LBVAC HB e NBCUR HB, pois estes solos em profundidade apresentam menor PT e maior quantidade de microporos e argila (tabela 10).

Tabela 10 – Valores médios relativos a quantidade de poros

Solo	Porosidade Total (%)	Macroporos (%)	Microporos (%)
LBVAC HA	67,7	19,9	47,8
LBVAC HB	61,9	9,7	52,2
LVCN HA	65,7	18,8	46,9
LVCN HB	65,1	15,8	49,3
NBCUR HA	68,2	20,4	47,8
NBCUR HB	61,4	10,7	50,7

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A UV dos solos variou de 23,3% a 58,1% sendo estas as amostras com menor e maior umidade obtidas antes do ensaio de compressibilidade. A  $\sigma_p$  é o parâmetro mais complexo para se determinar por conta do ponto de máximo raio de curvatura proposto pelo Casagrande, pois denota grande variância nas amostras em diferentes umidades, onde o coeficiente de variação (CV) foi de 49,49% no LVCN HB até 81,85% no NBCUR HB.

No LBVAC HA os valores médios de  $\sigma_p$  estão entre 102,5 a 166,1 kPa, porém a avaliação deve ser feita a partir das faixas de umidade, onde o solo mostrou-se sensível da  $\theta_v = 50\%$  até 36,3% causando compactação adicional irreversível ao solo com tensões menores que 100 kPa similar ao encontrado por Freitas, (2015) em um

Latossolo Vermelho, onde a  $\Psi_m$  de 6 a 100 kPa refletiu em valores de  $\sigma_p$  entre 16 e 100 kPa.

A partir dos 35,1% de  $\theta_v$  e regredindo o solo começa a ter maior resistência mecânica com valores de  $\sigma_p$  de 103 a 309 kPa quando o solo está bem seco a 25,7% de  $\theta_v$ .

O LBVAC HB mostrou-se mais resistente desde valores mais altos de  $\theta_v = 58\%$  até os 41,4%, onde a  $\sigma_p$  variou de valores próximos a 100 kPa até 213 kPa, para valores de  $\theta_v$  menores que 41,4% a tendência da  $\sigma_p$  foi crescente, gerando valores acima de 274 kPa e subindo conforme o solo perde umidade.

Vale enfatizar que ao chegar na condição de 35 a 25 % de  $\theta_v$ , o solo se comportou como um maciço argiloso com uma resistência muito alta a compressão uniaxial, um detalhe observado foi que conforme a  $\gamma_d$  aumentou nestes casos a  $\sigma_p$  diminuiu, pois, a deformação era tão pequena que a curva se comportou quase como uma reta, e pelos parâmetros de Casagrande para determinar o ponto de máximo raio de curvatura foi determinado valores de  $\sigma_p$  entre 28 a 92 kPa, com deformações próximas a 2 mm.

Na literatura é enfatizado que as pressões médias exercidas por tratores e colheitadeiras estão entre 100 e 200 kPa, todavia as carretas agrícolas podem ocasionar cerca de 600 kPa no solo, dependendo da carga que detêm. (CARPENEDO, 1994 *apud* SILVA *et al.*, 2000)

Na avaliação da resistência mecânica do NBCUR HA as umidades mais altas de 46 a 44,1% foram as que apresentaram menor  $\sigma_p$  entre 32 a 88 kPa, para valores de  $\theta_v$  menores que 43,8% a tendência foi positiva, onde a  $\sigma_p$  variou de 112 a 284 kPa.

No NBCUR HB a  $\gamma_d$  fez-se um atributo determinante na capacidade de suporte do solo, enfatizando que quanto maior a  $\gamma_d$  maior tornou-se a  $\sigma_p$ . Para valores de  $\theta_v = 52,6$  a 49,6% a  $\sigma_p$  variou de 34 a 153 kPa, conforme a umidade diminuiu a capacidade aumentou, onde  $\theta_v = 48,1$  a 41,4 % gerou  $\sigma_p$  de 81 a 589 kPa. Abaixo de  $\theta_v = 41,4$  algumas amostras se comportaram igual o LBVAC HB, mensurando curvas quase retilíneas e valores de  $\sigma_p$  de 95 a 143 kPa.

O LVCN HA mostrou-se um solo pouco resistente na  $\Psi_m = 6$  e 100 kPa, onde a  $\sigma_p$  variou de 41 a 111 kPa quando a  $\theta_v$  estava entre 49,1 a 36,4%. A capacidade de suporte sobe conforme o solo seca, e nas  $\theta_v$  de 36 a 27,9% a  $\sigma_p$  sobe para valores de 98 a 206 kPa. A faixa mais resistente é abaixo dos 30% de umidade enfatizando que a capacidade de suporte do solo pode chegar a valores de 331 kPa.

Oliveira *et al.*, (2003) encontrou valores de  $\sigma_p$  similares ao encontrado neste trabalho, onde um Latossolo Vermelho de Cerrado na  $\Psi_m = 6$  kPa obteve  $\sigma_p = 125$  kPa e na  $\Psi_m = 1500$  kPa as amostras obtiveram ganho em resistência elástica alcançando uma  $\sigma_p = 314$  kPa.

Para o LVCN HB a avaliação da capacidade de suporte foi similar ao encontrado no HA, na  $\Psi_m = 6$  kPa o solo apresentou menor resistência, onde a  $\sigma_p$  variou de 49 a 107 kPa nas faixas de umidade entre 50,3 a 46,8%. Para  $\Psi_m$  menores o solo ganhou maior resistência, porém em menor grau do que o encontrado no HA, sendo este o único solo do HB que apresentou esta característica.

Para as faixas de umidade entre 41,8 a 26,7% a  $\sigma_p$  variou de 108 a 279 kPa, abaixo destas umidades a  $\sigma_p$  apresentou característica similar ao encontrado nos outros horizontes do HB, deformação muito pequena, curvas de compressão quase retilíneas e  $\sigma_p$  entre 67 a 82 kPa.

O Cc por sua vez, teve um CV variando de 16,80% no LVCN HA até 45,77% no LBVAC HB (tabela 11). O LBVAC HA variou a densidade de 0,885 à 1,14 g/cm<sup>3</sup> e mostrou influência nos resultados do Cc, pois nas menores densidades o Cc chegou aos maiores valores entre (0,762 a 0,837). Silva *et al.*, (2000) ao estudar um Latossolo Vermelho-Escuro verificou que o Cc teve tendência de queda em amostras com grau de saturação entre 15 a 30% chegando a valores de 0,1 e 0,2 na maioria das amostras e nos solos com 30 a 60% de grau de saturação o Cc se mostrou maior alcançando valores próximos a 0,6.

O Cc nos horizontes superficiais destes solos apresentou valores máximos (0,781 a 0,858) superiores ao encontrado nos solos com HB (0,391 a 0,822), demonstrando que os solos do HA são mais suscetíveis a compactação que do HB. O solo que apresentou o maior CV foi o LBVAC HB cerca de 45,7%, sendo este o solo com o menor Cc do banco de dados (0,101).

O NBCUR HB foi o solo que apresentou as menores deformações plásticas com Cc médio de 0,233, e o LVCN HA obteve Cc de 0,442 a 0,858. Freitas (2015) avaliando um Latossolo Vermelho, obteve valores de Cc entre 0,15 a 0,46, neste trabalho chegou-se a valores maiores, fato este deve estar atrelado a zona de coleta que se refere a mata nativa e no trabalho do Freitas as amostras foram coletadas em zonas de plantio direto e algumas pré compactadas.

Tabela 11 – Estatística descritiva para as propriedades e parâmetros físicos obtidos das curvas de compressão para os dois horizontes dos solos avaliados

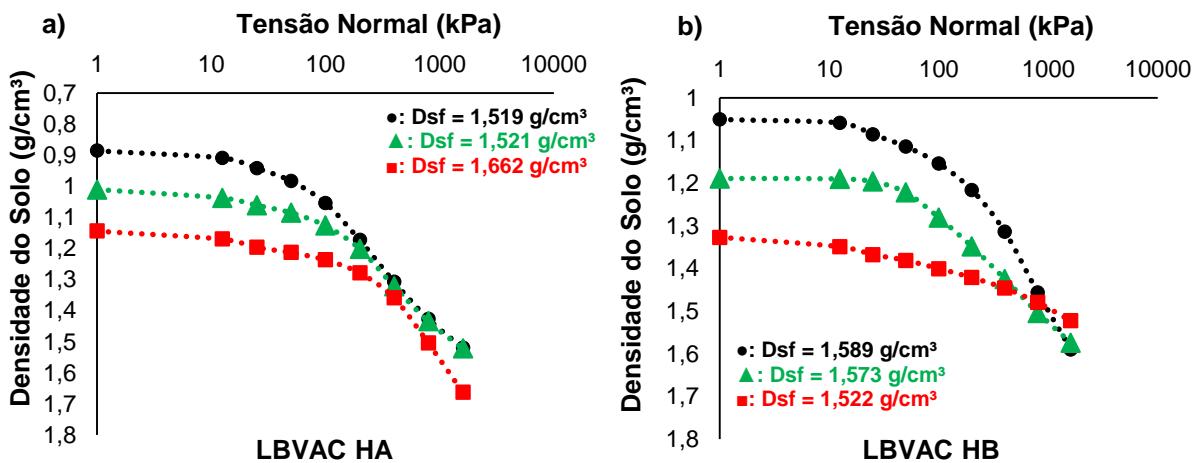
Horizonte	Variável																			
	Densidade do solo (g/cm <sup>3</sup> )					Umidade volumétrica (%)					Pressão de pré-consolidação (kPa)					Índice de compressão				
	Média	Desvio	CV%	Min	Max	Média	Desvio	CV%	Min	Max	Média	Desvio	CV%	Min	Max	Média	Desvio	CV%	Min	Max
<b>Latossolo Bruno Distrófico Típico (LBVAC)</b>																				
<b>HA</b>	1,03	0,06	6,04	0,88	1,14	37,2	7,7	20,76	24,9	50,5	102,5	68,23	66,54	23,7	309,8	0,53	0,14	26,55	0,269	0,837
<b>HB</b>	1,238	0,06	5,30	1,05	1,32	42,8	8,9	20,76	25,3	58,1	135,3	89,13	65,84	28,3	336	0,288	0,13	45,77	0,101	0,58
<b>Latossolo Vermelho Distrófico Retráctico (LVCN)</b>																				
<b>HA</b>	1,01	0,05	5,89	0,90	1,12	33,9	7	20,73	25	49,1	159,7	80,97	50,67	41,1	331,8	0,625	0,105	16,80	0,442	0,858
<b>HB</b>	1,068	0,067	6,29	0,88	1,16	37,4	8,6	22,98	23,3	50,3	126	62,38	49,49	49,3	279,5	0,409	0,18	44,10	0,137	0,822
<b>Nitossolo Bruno Distrófico Húmico (NBCUR)</b>																				
<b>HA</b>	1,046	0,073	7,06	0,92	1,21	39,7	6,5	16,40	27,4	50,9	127,3	74,37	58,39	32,7	284	0,503	0,111	22,12	0,278	0,781
<b>HB</b>	1,30	0,048	3,72	1,21	1,38	46,1	4,5	9,88	34,9	52,6	166,1	136,01	81,85	34,3	589,6	0,233	0,058	24,83	0,121	0,391

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Desvio: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Min: valor mínimo; Max: valor máximo.

Para avaliar o efeito da variação da  $\gamma_d$  na compressibilidade os gráficos na figura 17 por intermédio das curvas de compressão (a,b) enfatizaram que o LBVAC HA apresentou maior densidade do solo final (Dsf) a medida que a densidade do solo inicial (Dsi) aumentou. Ao contrário do LBVAC HB que conforme a Dsi aumentava a Dsf regredia. No LBVAC HB a densidade partiu para valores maiores de até 1,326 g/cm<sup>3</sup>, onde esta  $\gamma_d$  atribuiu valores menores de Cc cerca de 0,116 e consequentemente uma Dsf inferior as outras amostras.

Figura 17 – Curvas de compressão do LBVAC. a) Horizonte A; b) Horizonte B.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Depois de realizados alguns testes de compressibilidade e as amostras retiradas da estufa, a diferença na retração entre os dois horizontes do LBVAC é grande, onde o HA apresentou um nível bem maior se comparado ao HB (figura 18).

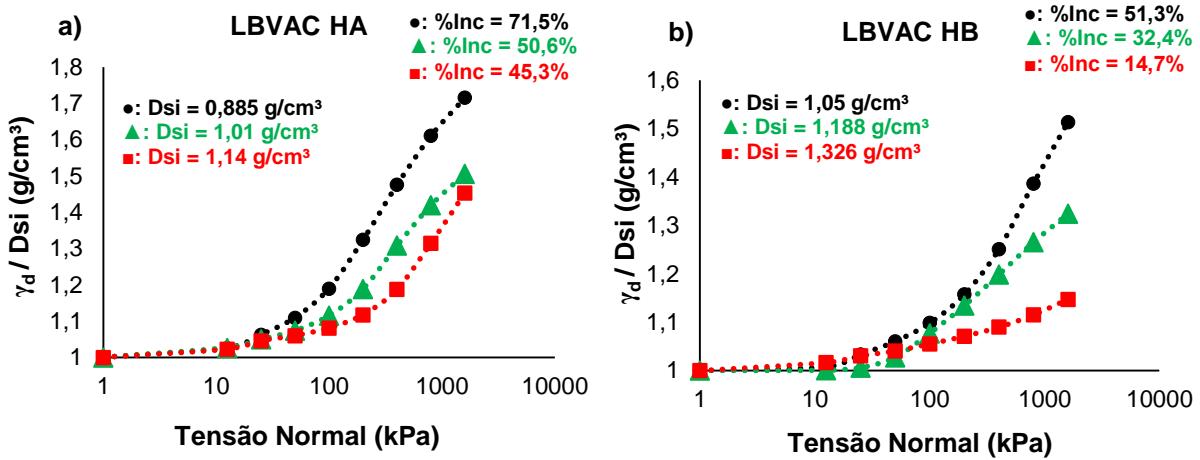
Figura 18 – Diferença de retração do LBVAC HA e HB depois das amostras serem compactadas e secas em estufa



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A avaliação da compressibilidade pelas curvas de compressão normalizadas denotam que de modo geral o LBVAC HA apresentou maior %Inc em relação aos outros solos predispondo, que tensão normal ( $\sigma$ ) acima de 42 kPa já causa uma susceptibilidade maior a compactação, pois adentra a região de deformação plástica do solo, onde os efeitos são irreversíveis à estrutura do solo (figura 19a).

Figura 19 – Curvas de compressão normalizadas (a,b) evidenciando a densidade como parâmetro determinante na compressibilidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

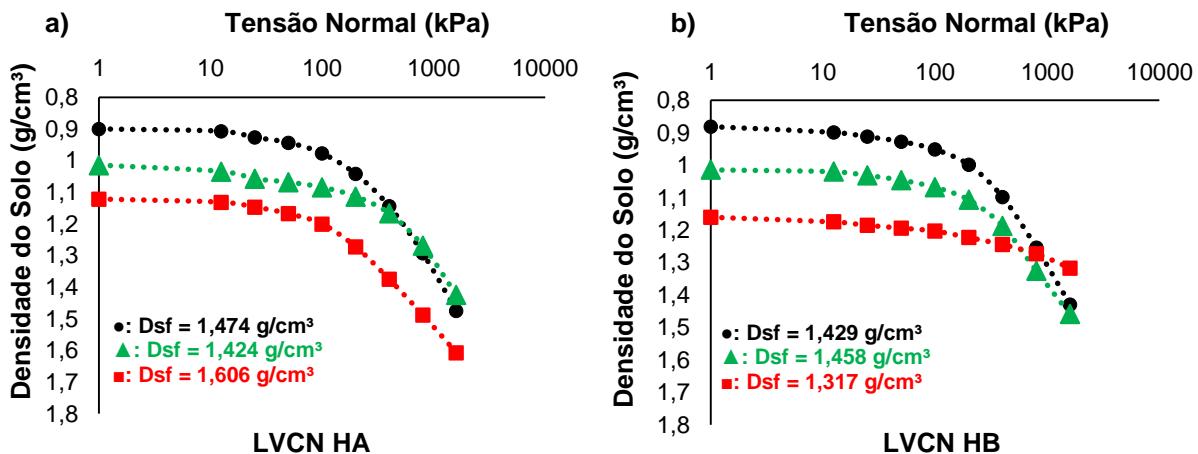
Então é visível que ocorreu um forte incremento da densidade do solo em relação ao estado inicial (%Inc) cerca de 71,5% no LBVAC HA.

No LBVAC HB o maior %Inc foi nas amostras com menor  $\gamma_d$  chegando a valores de 51,3%, porém as amostras com  $\gamma_d$  acima de 1,3 g/cm<sup>3</sup> geraram %Inc baixo na casa dos 14,7% (figura 19b).

Na figura 20 o LVCN, onde a densidade tanto para HA quanto para HB permaneceram próximas, evidenciando um solo mais homogêneo, nos ensaios as amostras com  $\gamma_d$  próximas a 0,9 g/cm<sup>3</sup> obtiveram os maiores ganhos em incremento de  $\gamma_d$ , cerca de 63%. Oliveira *et al.*, (2003) ao estudar um Latossolo Vermelho de cerrado, obteve amostras do HA com  $\gamma_d$  próxima a 1,0 g/cm<sup>3</sup> após expor as mesmas a uma  $\Psi_m = 6$  kPa no teste de compressibilidade a Dsf chegou a valores próximos de 1,5 g/cm<sup>3</sup> após a última carga de 1600 kPa, ou seja, valores similares ao encontrado neste trabalho.

O Cc por sua vez chegou a valores de 0,858 no HA e 0,822 no HB, ou seja, comportamento compressivo similar em menor  $\gamma_d$ .

Figura 20 – Curvas de compressão do LVCN. a) Horizonte A; b) Horizonte B.

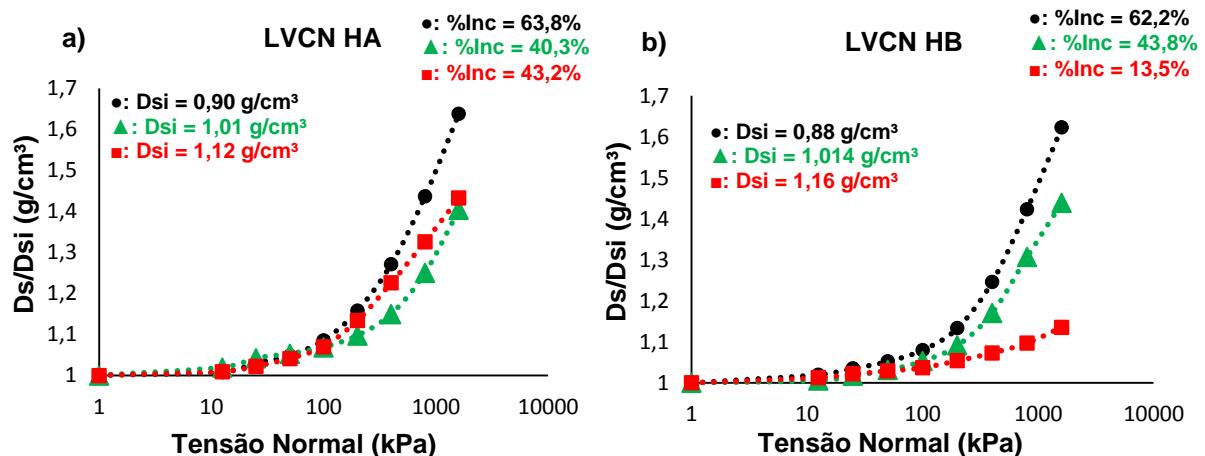


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As amostras do HA com  $D_{si}$  entre 1 a 1,12  $\text{g}/\text{cm}^3$  teve %lnc na faixa dos 40,3 a 43,2% (figura 21a). Todavia amostras com  $\gamma_d$  alta (1,16  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) no HB resultaram em pequeno %lnc = 13,5%, em contradição com o maior valor de  $\gamma_d$  do HA.

O solo que obteve menor %lnc foi o LVCN HB cerca de 13,5%, ou seja, quando a umidade deste solo é menor, o mesmo tem sua capacidade de suporte de carga potencializada, resistindo cerca de 219 kPa antes de entrar na zona plástica de compactação (figura 21b).

Figura 21 – Curvas de compressão normalizadas (a,b) evidenciando a densidade como parâmetro determinante na compressibilidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

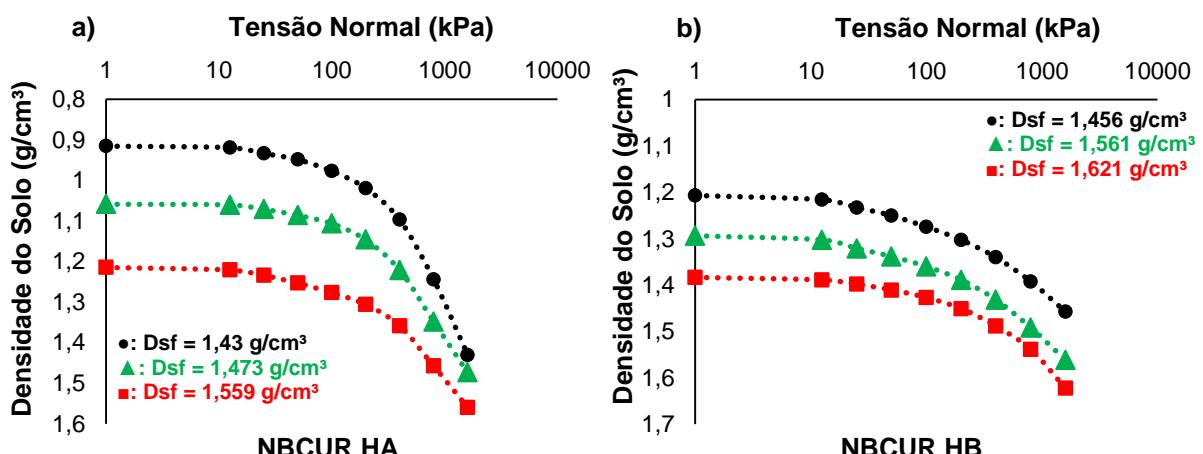
A figura 22ab, enfatiza o NBCUR, onde a reta de compressão virgem teve maior representatividade no HA, pois apresentou amostras com menor  $\gamma_d$  (0,915  $\text{g}/\text{cm}^3$ ), no

HB a  $Dsf = 1,621 \text{ g/cm}^3$  chegou a valores superiores que obtidas no HA, caracterizando que a mudança textural influenciou no processo de compressibilidade.

No HA o solo teve comportamento similar ao de argilas normalmente adensadas, onde a curva fica mais pronunciada, caracterizando que o solo é mais suscetível a compactação.

No HB o solo se comportou similarmente a argilas pré adensadas, onde após o efeito da compressibilidade a curva de compressão apresenta uma curvatura menor, evidenciando que o solo apresenta histórico de tensões e que a  $\gamma_d$  não aumenta com grande rigor se comparado ao HA.

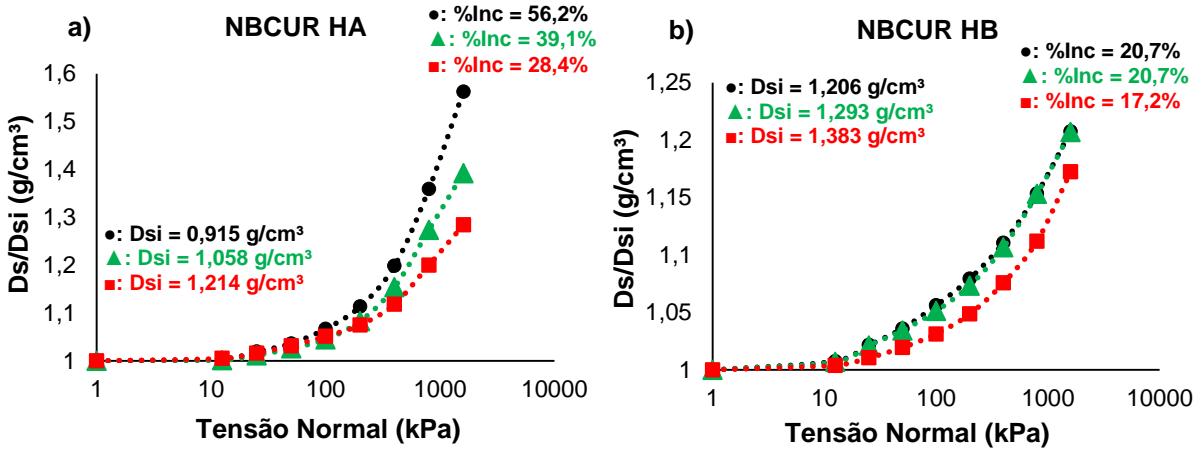
Figura 22 – Curvas de compressão do NBCUR. a) Horizonte A; b) Horizonte B.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No NBCUR HA o  $C_c$  alcançou valores superiores a 0,70 mensurando uma %Inc de 56,2% diferentemente do HB que por abrangeu uma maior  $\gamma_d$  (1,20 a 1,38  $\text{g/cm}^3$ ) exibiu um comportamento compressivo menor com incremento na  $\gamma_d$  na casa dos 20% (figura 23ab).

Figura 23 – Curvas de compressão normalizadas (a,b) evidenciando a densidade como parâmetro determinante na compressibilidade

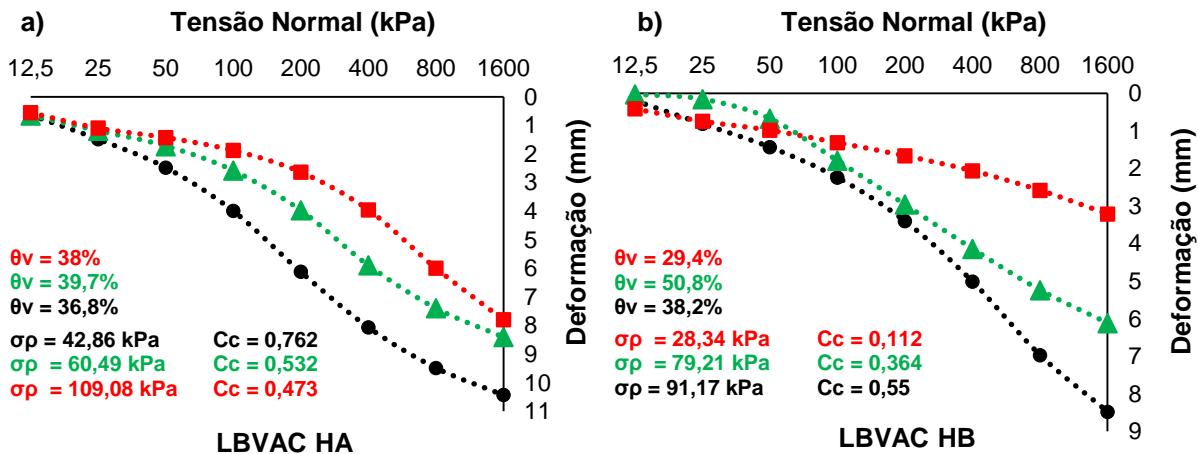


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para avaliar as deformações do banco de dados, definiu-se que três amostras com diferentes umidades fossem plotadas e verificadas o seu comportamento compressivo. Ademais a amplitude do banco de dados também foi verificada, a fim de saber as umidades que geram maior recalque, e quais amostras apresentaram maior resistência à deformação.

As deformações mensuradas na figura 24ab demonstra que a PT tem grande influência neste processo, pois cerca de 60 a 70% da composição (solo, água e ar) é representada somente pela parcela do ar nos solos objeto de estudo, similar ao encontrado por Gaspari *et al.*, (2020) em Latossolo Bruno de Santa Catarina uma PT de 65%.

Figura 24 – Deformações dos solos em diferentes umidades (a,b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

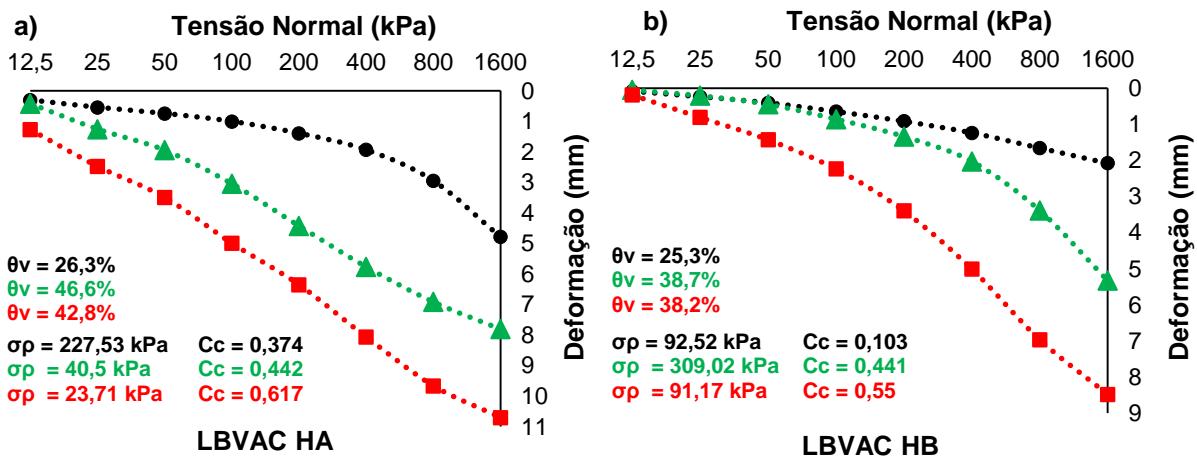
O LBVAC HA se mostrou um solo bem compressível chegando a cerca de 11

mm de deformação ao final do ensaio ( $\theta_v = 42,8\%$ ), evidenciando que nesta zona de umidade o solo é bem compressível, pois valores de  $\sigma_p$  (23 a 43 kPa) caracterizam sua capacidade de suporte, onde as deformações são elásticas e recuperáveis (figura 24a).

Após uma secagem prolongada com  $\theta_v$  próxima aos 26%, ocasionou um aumento da capacidade de suporte do solo para cerca de 227,53 kPa, porque o rearranjo das partículas do solo através da adesão-coesão conferem ao solo maior resistência mecânica devido ao atrito resultante delas, todavia as amostras com maiores  $\theta_v$  (46 a 50%) gerou uma  $\sigma_p$  (30 a 70 kPa) menor e uma deformação menor, pois as partículas de água atuam como agentes incompressíveis ao envolto das partículas de solo, atrapalhando o processo de compactação.

O LBVAC HB mostrou-se um solo muito resistente quando chega a valores mais baixos de umidade ( $\theta_v=25,3\%$ ), a deformação ficou na casa dos 2 mm apenas, gerando um comportamento quase retilíneo da curva de compressibilidade, em geral, pode-se afirmar que nessa condição de umidade o HB teve mais que o dobro de resistência que o HA, atributo este que pode estar relacionado com a textura e a MOS, todavia em umidades medianas ( $\theta_v=38,2\%$ ) o LBvac HB demonstrou comportamento compressível chegando a quase 9 mm de deformação (figura 25b).

Figura 25 – Amplitude no banco de dados das deformações (a,b)

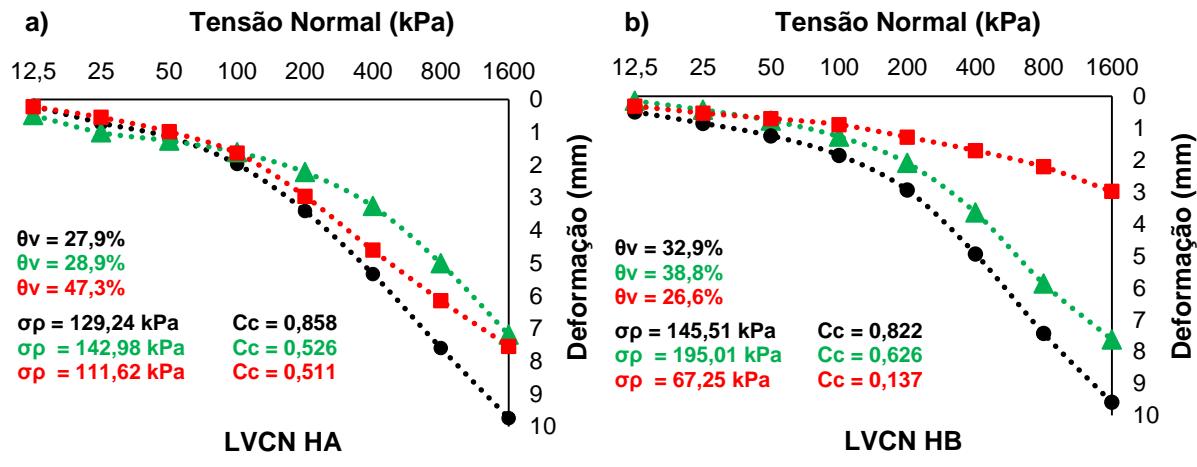


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A variação das deformações no LVCN HA, segundo a figura 26a , mostrou que amostras na zona de  $\theta_v = 36,4\%$  tiveram um recalque acentuado de mais de 10 mm de deformação no gráfico a, predispondo um comportamento similar do gráfico b, onde uma amostra recalcou quase o mesmo valor, porém com uma  $\theta_v = 27,9\%$  bem menor,

enfatizando que se a  $\gamma_d$  for baixa mesmo o solo estando mais seco, este terá comportamento compressível, pois a PT destes solos chega a uma média de 65%, no geral amostras com  $\gamma_d$  um pouco maior e mais secos  $\theta_v = 25,1\%$  chegam a deformações de cerca de 5,5 mm.

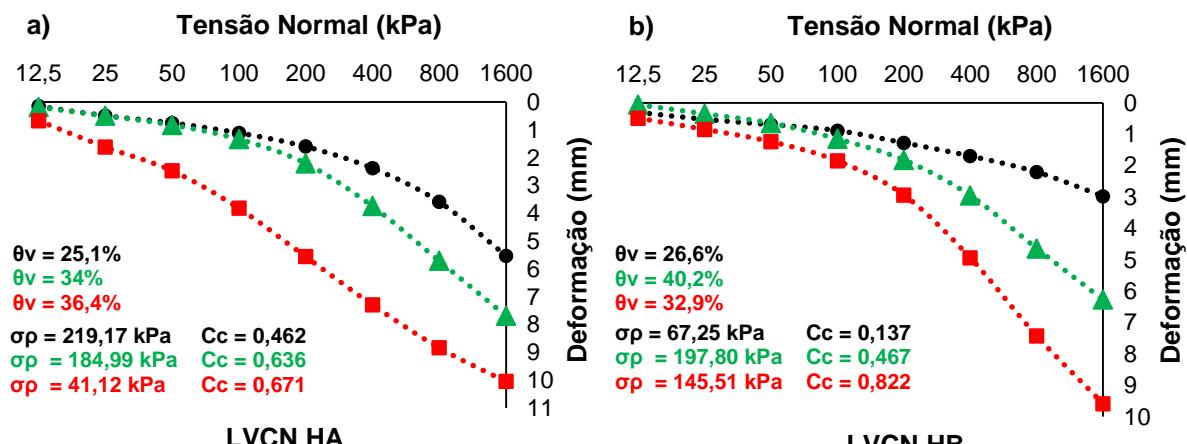
Figura 26 – Deformações dos solos em diferentes umidades (a,b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No LVCN HB as amostras se comportaram com similaridade ao HA, pois as deformações máximas chegaram a quase 10 mm dando ênfase a  $\gamma_d$ , pois para alcançar essa deformação a amostra apresentou a menor  $\gamma_d$  do banco de dados, e amostras com maior umidade  $\theta_v = 40,2\%$  demonstraram recalque mediano na casa dos 6,5 mm, e em teores mais baixos de umidade o solo teve um recalque de 3mm, evidenciando uma maior resistência a compressão na  $\theta_v = 26,6\%$  (figura 27ab).

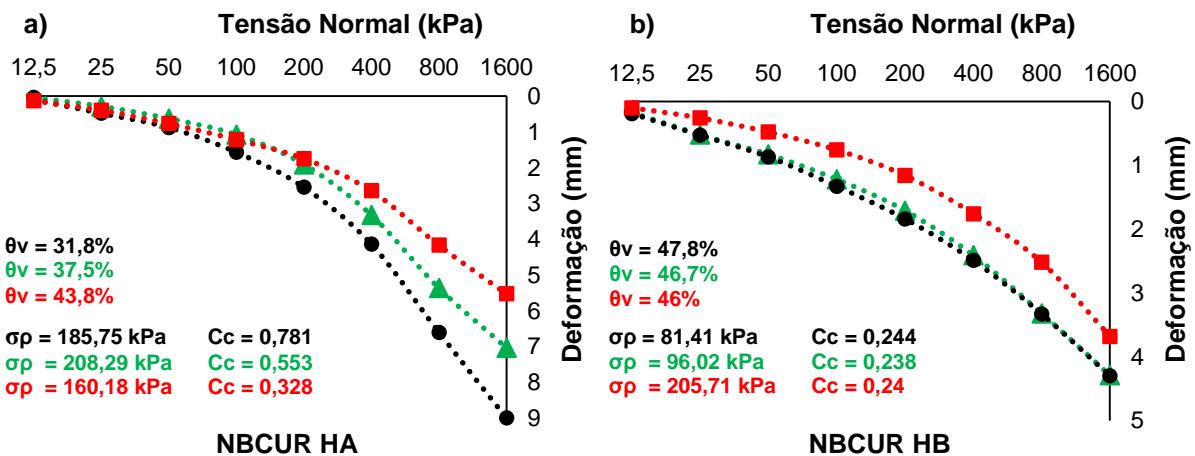
Figura 27 – Amplitude no banco de dados das deformações (a,b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nos resultados do NBCUR HA a  $\sigma_p$  apresentou valores maiores mesmo o solo apresentando  $\gamma_d$  menor ( $\sigma_p = 185,75 \text{ kPa}$ ) e o  $C_c$  teve maior expressividade na amostra mais seca com  $\theta_v = 31,8\%$  gerando maior deformação na amostra, evidenciando que a  $\gamma_d$  indica maior deformação que a  $\theta_v$ . É notório que as deformações no HA aumentam depois de  $\sigma = 200 \text{ kPa}$  levando a reta de compressão virgem para cotas inferiores ao encontrado no HB (figura 28ab).

Figura 28 – Deformações dos solos em diferentes umidades (a,b)

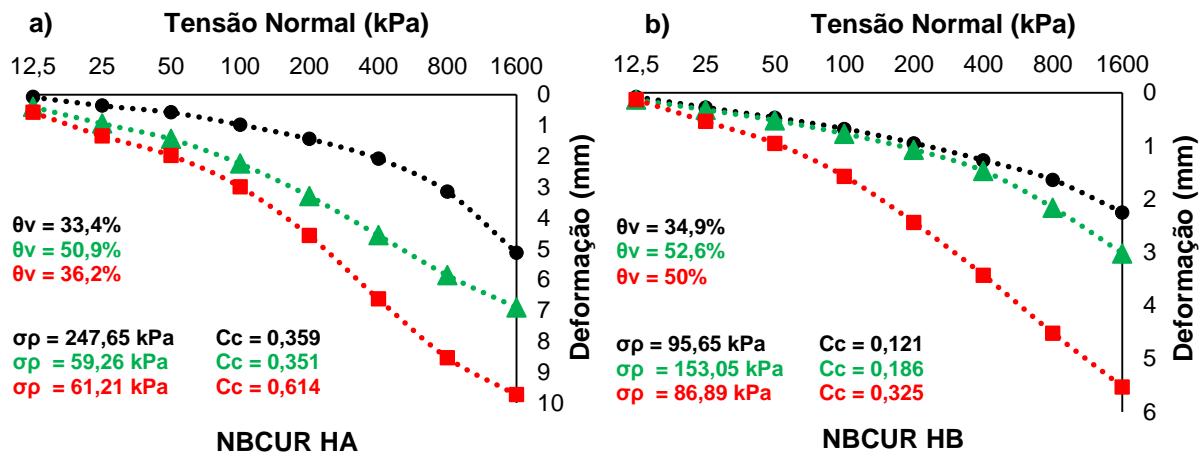


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na amplitude dos dados, a amostra do HA que estava com  $\theta_v = 36,2\%$  apresentou recalque próximo a 10 mm em contrapartida amostras com  $\theta_v$  próxima a 33% apresentaram recalque ameno cerca de 5 mm. Os solos com teor de umidade mais alto representaram um recalque médio, uma amostra com  $\theta_v = 50,9\%$  chegou a recalcar 7 mm, denotando uma capacidade de suporte bem menor ( $\sigma_p = 59,26 \text{ kPa}$ ) se comparado com solos mais secos ( $\sigma_p = 247,65 \text{ kPa}$ ).

Para o NBCUR HB o comportamento compressivo se mostrou bem diferente, cerca de 40% menor que os recalques máximos no HA, onde a amostra com  $\theta_v = 50\%$  apresentou quase 6 mm de deformação e subindo o teor de umidade para 52,6% temos uma deformação na casa dos 3 mm esta por sua vez bem próxima a deformação exercida na amostra com  $\theta_v = 34,9\%$  que apresentou 2,3 mm de recalque (figura 29ab).

Figura 29 – Amplitude no banco de dados das deformações (a,b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

É notório que a densidade chegará em níveis maiores quando o solo está na Uoc, mas o fator que mais se destaca é a densidade inicial mais baixa (sem selamento superficial da amostra), a  $\theta_v$  na hora do ensaio também é muito importante, pois conforme aumentam as tensões no solo a água é drenada pelas pedras porosas, e se o solo está com  $\theta_v$  menor estes tendem a ter pouco aumento na densidade por conta dos efeitos de adesão e coesão das partículas.

#### 4.2.1 – Pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ )

Na análise de variância da  $\sigma_p$  foi evidenciada a diferença estatística e significância (\*\*) para todos os horizontes e umidades exceto no NBCUR, onde a  $\sigma_p$  não se mostrou significante entre os horizontes e entre o horizonte x umidade, indicando que apenas a umidade foi determinante nesta variável (tabela 12).

Tabela 12 – Análise de Variância da Pressão de Pré-consolidação ( $\sigma_p$ )

Fator de Variação	LBVAC	NBCUR	LVCN
	Valor de P e significância		
HORIZONTE	0,001**	0,485ns	0,037**
UMIDADE	<0,001**	0,003**	<0,001**
HORIZONTE x UMIDADE	<0,001**	0,686ns	0,005**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

De acordo com a correlação disposta no apêndice B, a  $\sigma_p$  mostrou-se uma variável correlacionável negativamente com a UV, PT, MOS, Índice de retração anel com areia (IR-A) e Índice de retração tese - sucção matricial e secamento em estufa (IR-T), onde a UV foi o atributo que apresentou maior correlação ( $r = -0,276$ ) dando

ênfase que conforme a UV decresce a  $\sigma_p$  tende a subir, assim como os outros atributos. O Cc foi o único atributo que correlacionou positivamente (0,198) com a  $\sigma_p$ .

Na tabela 13 foram explanadas equações empíricas dos comportamentos da  $\sigma_p$  em cada solo, e apenas o LVCN HB não teve um ajuste bom com  $R^2$  acima de 0,7.

Em geral os solos apresentaram erro variando de 34,77 a 50,05 e o número de amostras foi menor no LVCN HB, fato este pode estar atrelado ao menor  $R^2$  de 0,238.

Tabela 13 – Equações ajustadas para estimativa da pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) em função da umidade volumétrica ( $\theta_v$ ) e da densidade do solo ( $\gamma_d$ )

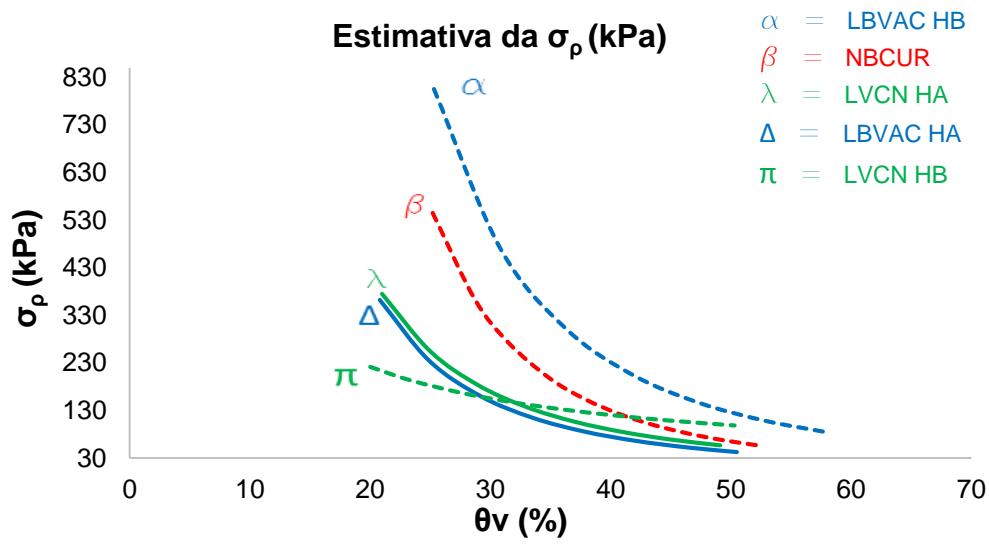
<b>Solo</b>	<b>Equação ajustada</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>Erro</b>	<b>N</b>
LVCN HA	$\sigma_p = 11,0189 \times \theta_v^{-2,22543} \times \gamma_d^{5,52336}$	0,707	34,83	17
LVCN HB	$\sigma_p = 53,5738 \times \theta_v^{0,882083} \times \gamma_d^{0,0682621}$	0,238	49,87	16
LBVAC HA	$\sigma_p = 8,10393 \times \theta_v^{-2,41065} \times \gamma_d^{1,57294}$	0,711	38,66	38
LBVAC HB	$\sigma_p = 28,4743 \times \theta_v^{-2,72477} \times \gamma_d^{-2,33263}$	0,701	50,05	25
NBCUR	$\sigma_p = 6,17801 \times \theta_v^{-3,1077} \times \gamma_d^{1,40408}$	0,708	34,77	30

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Então por intermédio das equações obteve-se as estimativas da  $\sigma_p$  de cada horizonte dos solos avaliados variando a umidade, e utilizando uma média das  $\gamma_d$  de cada horizonte foram plotadas as curvas na figura 30, onde é nítido que em umidades maiores que 40% os solos têm comportamentos similares, e na medida que a  $\Psi_m$  aumenta os solos se comportam de maneira diferente, gerando uma maior inflexão das curvas, denotando que a capacidade de suporte de carga dos solos aumenta.

Quando a  $\theta_v$  alcança valores próximos a 30% a  $\sigma_p$  começa a subir e conforme a secagem do solo acontece os valores podem chegar a cerca de 800 kPa no LBVAC HB, mostrando que este solo a condições de seca tem grande resistência a compressão, o NBCUR como não obteve diferença estatística entre os horizontes, teve apenas uma curva mensurada a fim de demonstrar que o comportamento da  $\sigma_p$  neste solo é igual para os dois horizontes.

Figura 30 – Estimativa da  $\sigma_p$  utilizando as equações ajustadas

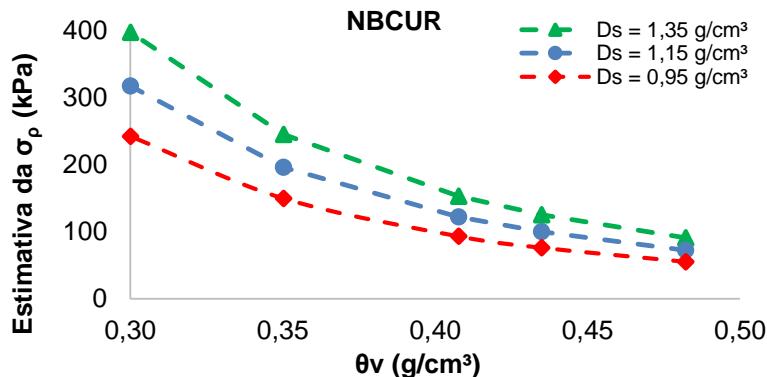


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nas curvas das figuras 31, 32 e 33 para a estimativa da  $\sigma_p$ , usou-se a maior, a média e a menor  $\gamma_d$  do banco de dados de cada solo.

Em geral quando a  $\gamma_d$  é menor os valores estimados de  $\sigma_p$  são menores, segundo a figura 31, na casa dos 30% de  $\theta_v$  todos os solos apresentaram aumento a  $\sigma_p$  que chegou a valores próximos a 400 kPa.

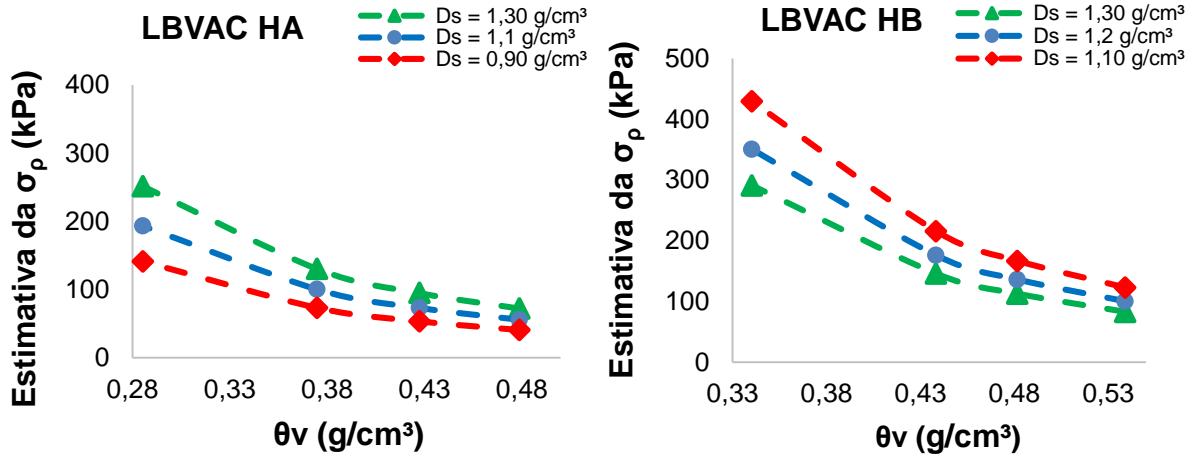
Figura 31 – Estimativa da  $\sigma_p$  do NBCUR HA e HB em diferentes  $\gamma_d$



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na figura 32, o LBVAC mostra que a  $\sigma_p$  se diferencia entre os horizontes, e que mesmo em densidades menores o HB alcança valores superiores de  $\sigma_p$ , caracterizando-o como mais resistente que o HA. Com a  $\theta_v$  próxima a 28% o HA começa a ter resistência elástica de 150 a 250 kPa, enquanto no HB a 33% de  $\theta_v$  esses valores já são praticamente o dobro e tem tendência de ganho de  $\sigma_p$  a medida que o solo seca.

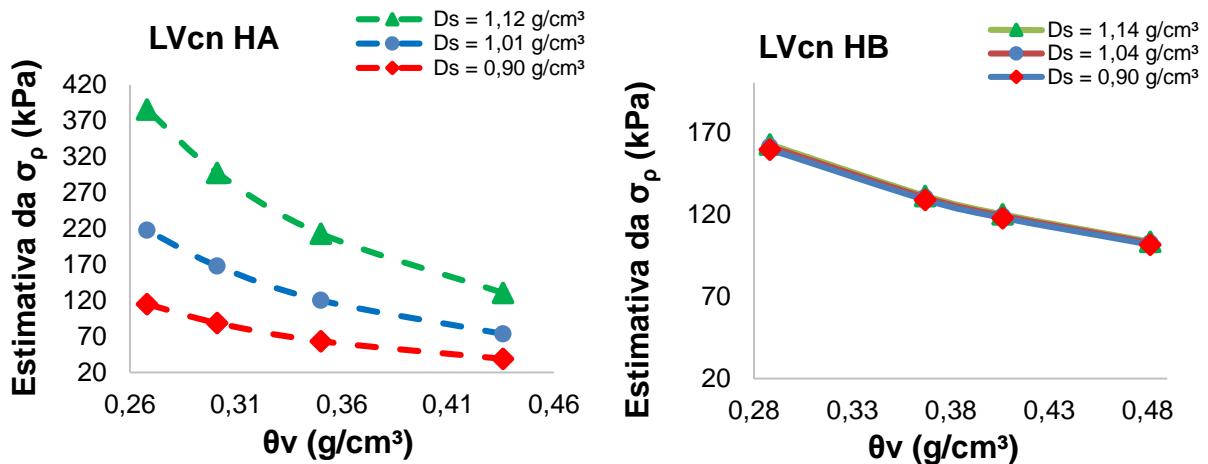
Figura 32 – Estimativa da  $\sigma_p$  do LBVAC em diferentes  $\gamma_d$



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Avaliando o LVCN, a figura 33 denota que o HA se mostrou um solo pouco resistente, quando o solo está mais úmido ( $\Psi_m = 6 \text{ kPa}$ ) principalmente quando a  $\gamma_d$  é menor, em contrapartida se a  $\gamma_d$  aumenta para valores próximos a  $1,12 \text{ g}/\text{cm}^3$  a  $\sigma_p$  tende a triplicar de valor, e quando a  $\theta_v$  fica na casa dos 26% o solo apresenta grande resistência mecânica chegando a  $\sigma_p = 385,8 \text{ kPa}$ , onde nesta  $\Psi_m$  o solo já apresenta retração, ou seja, os macroporos migram a água para os microporos durante a curva de secagem cujo rearranjo das partículas transformam os macroporos em microporos durante a retração, conferindo maior resistência.

Figura 33 – Estimativa da  $\sigma_p$  do LVCN em diferentes  $\gamma_d$



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No HB o ajuste do  $R^2$  ficou baixo e por isso teve pouca diferença entre as variações de  $\gamma_d$ , e mostrou-se um solo com uma maior  $\sigma_p$  em condições de maior

umidade se comparado aos outros, caracterizando um solo com maior resistência elástica em dias chuvosos, e o comportamento foi de aumento na  $\sigma_p$  a medida que o solo perde umidade.

#### 4.2.2 Índice de compressão (Cc)

Conforme a tabela 14, os resultados mostraram que o LVCN teve diferença estatística significante com todas as variáveis, o LBVAC apresentou significância apenas entre os horizontes e no NBCUR apenas a umidade não apresentou significância.

Tabela 14 – Análise de Variância do Índice de Compressão (Cc)

<b>Fator de Variação</b>	<b>LBVAC</b>	<b>NBCUR</b>	<b>LVCN</b>
	Valor de P e significância		
HORIZONTE	<0,001**	<0,001**	<0,001**
UMIDADE	0,100ns	0,090ns	<0,001**
HORIZONTE x UMIDADE	0,626ns	0,024**	0,019**

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

\*\* = Significativo a 1% e ns = não significativo

A variável que apresentou grandes correlações foi o Cc (apêndice B), onde a  $\gamma_d$  foi o atributo determinante correlacionando negativamente (-0,854) com o Cc, em seguida temos a argila que também apresentou grande representatividade ao Cc (-0,714), fato este bem visível nas análises, pois os solos que apresentavam maior quantidade de argila eram do HB e o Cc mostrou-se menor nestes solos.

A MOS apresentou correlação positiva com o Cc (0,325), pois os solos do HA que consequentemente apresentavam maior teor de MOS, foram os solos que tiveram maior amplitude na deformação gerando valores mais altos do Cc.

Diferentemente da  $\sigma_p$  o Cc não apresentou correlação com o IR-A e o IR-T, porém apresentou correlação negativa com o Índice de retração cole modificado (IR-C) e o Índice de retração mercúrio metálico (IR-M).

O IR-C apresentou sua maior correlação com o IP (-0,89) e o IR-M apresentou forte correlação com os outros índices de retração, mas também teve correlação negativa com o LL (-0,78).

O IR-A e o IR-T apresentaram forte correlação positiva com a MOS (0,88 e 0,73), respectivamente.

Na análise do ajuste das equações, obtivemos diferenças entre os solos, pois o menor ajuste do  $R^2$  foi encontrado no NBCUR HB com valor de 0,555 e o maior valor foi no LBVAC HB (0,828) conforme a tabela 15.

Em geral o Cc se mostrou correlacionado com a  $\gamma_d$  e a  $\theta_v$ , mas a iminência não foi efetiva em todos os solos, pois o NBCUR HB apresentou correlação somente com a  $\theta_v$ , enquanto no LBVAC e LVCN HA foi somente com a  $\gamma_d$ .

Tabela 15 – Equações ajustadas para estimativa do índice de compressão (Cc) em função da umidade volumétrica ( $\theta_v$ ) e da densidade do solo ( $\gamma_d$ ) para todos os solos

Solo	Equação ajustada	$R^2$	Erro	N
NBCUR HA	$Cc = 3,04465 - 1,09677 \times \gamma_d - 3,53717 \times \theta_v^2 - 0,317564 \times 1/\theta_v$	0,783	0,05	20
NBCUR HB	$Cc = 0,906221 - 3,33131 \times \log(\theta_v) - 1,49254 \times 1/\theta_v$	0,555	0,02	16
LBVAC HA	$Cc = -1,10925 + 1,69894 \times 1/\gamma_d$	0,644	0,07	37
LBVAC HB	$Cc = 2,25653 - 1,30458 \times \log(\theta_v) - 0,563949 \times 1/\theta_v - 1,38791 \times \gamma_d$	0,828	0,05	37
LVCN HA	$Cc = 1,97076 - 1,32281 \times \gamma_d$	0,568	0,07	19
LVCN HB	$Cc = 1,7921 - 0,0637209 \times 1/\theta_v - 1,05018 \times \gamma_d^2$	0,77	0,09	19

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nos horizontes superficiais o Cc tem maior predominância em menor  $\gamma_d$ , ou seja, enfatiza que está em concordância com as curvas de compressão normalizadas já apresentadas neste trabalho, que mostra que a  $\gamma_d$  em menor magnitude acarreta em grande incremento na Dsf, após o término do ensaio de compressibilidade.

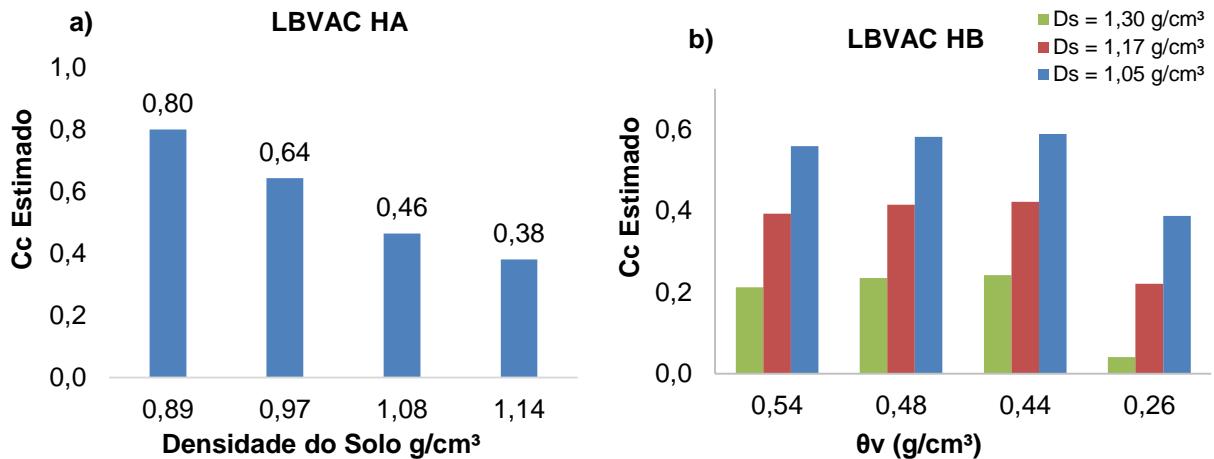
O modelo geral contendo todos os solos chegou a um ajuste de  $R^2$  de 0,844, onde todos os solos apresentam a mesma característica de retração e expansão, porém em escalas diferentes, mas o comportamento do Cc se mostrou similar em todos os solos.

Uma equação geral foi proposta para estimar o Cc e no modelo foram aplicados todos os índices físicos, e somente a  $\theta_v$ ,  $\gamma_d$ , argila, IP e MOS entraram no modelo, dando ênfase que estes atributos geram diferenças nas deformações plásticas que ocorrem no solo.

Aplicando as equações empíricas da tabela 15 chegamos aos valores estimados do Cc, na figura 34ab mostra que no LBVAC HA os maiores valores do Cc é quando a  $\gamma_d$  está baixa, e no HB as estimativas variam conforme a  $\theta_v$  e a  $\gamma_d$  e mensura que entre as umidades de 44 e 54% o comportamento é similar, mas quando

a umidade cai para 26% o solo tem grande resistência na susceptibilidade a compactação, chegando aos menores valores de  $C_c = 0,04$  quando a  $\gamma_d$  está em  $1,30 \text{ g/cm}^3$ .

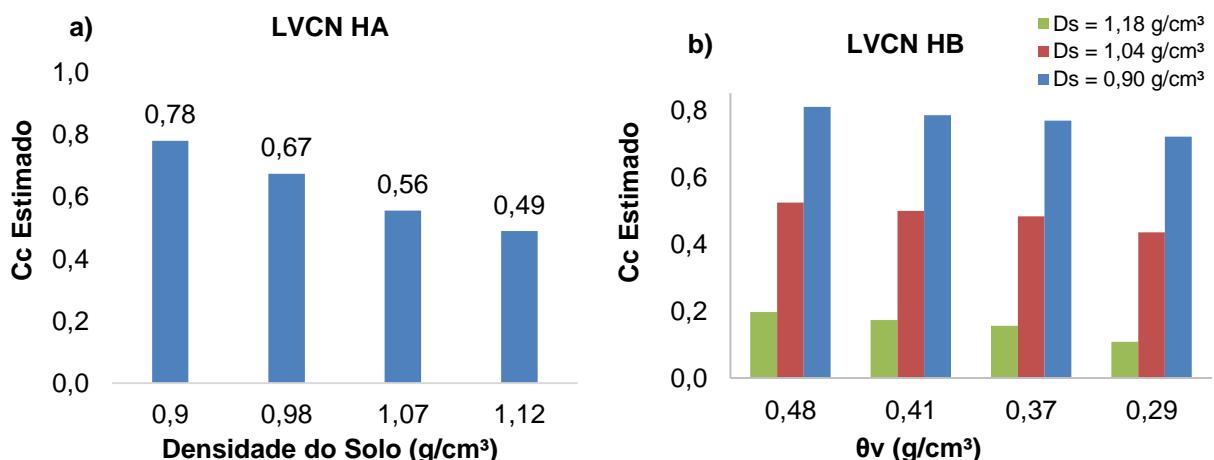
Figura 34 – Índice de compressão estimado do LBVAC



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na figura 35 o LVCN HA mostra comportamento similar ao visto anteriormente no LBVAC HA, denotando que a  $\gamma_d$  é decisiva para alteração do  $C_c$ , pois geralmente nos horizontes subsuperficiais a MOS tem maior iminência gerando valor de  $\gamma_d$  menor. No HB apesar da MOS ser menor, o comportamento do  $C_c$  foi similar ao HA quando o solo apresentou  $\gamma_d = 0,9 \text{ g/cm}^3$  e a medida que a  $\gamma_d$  sobe os recalques diminuem, alcançando valores do  $C_c = 0,11$  quando o solo está na condição de  $\gamma_d$  alta e umidade baixa, conferindo solidez e alta resistência a compressão.

Figura 35 – Índice de compressão estimado do LVCN



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

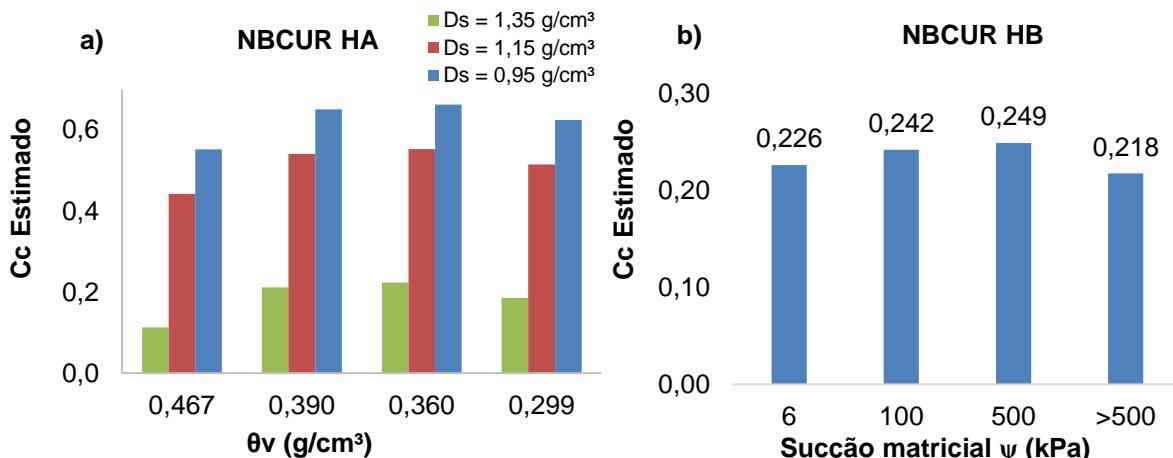
Silva *et al.*, (2000) encontrou valores de Cc (0,2 a 0,6) em um Latossolo Vermelho Escuro em amostras com Dsi <1,30 g/cm<sup>3</sup>, valores similares ao encontrado neste trabalho.

O NBCUR HA apresentou comportamento diferente aos outros solos do HA, na figura 36 é nítido que o solo em maior umidade ( $\theta_v=46\%$ ), não apresentou uma grande susceptibilidade a compactação, pois mensurou valor do Cc menor se comparado a  $\theta_v=36\%$ , mas conforme o solo perde umidade e fica abaixo da casa dos 29% o Cc tende a cair também, se comportando igual aos outros solos.

No HB a estimativa do Cc teve comportamento similar ao HA, pois quando expostos a  $\Psi_m$  de 6 e 100 kPa o solo se mostrou menos suscetível a compactação, isso deve-se ao fato que os filmes de água que estão na porosidade do solo, conferem resistência a compressão, pois a água é incompressível, e quando expostos a  $\Psi_m$  de 500 kPa o solo tende a compactar mais, pois a ação da água não é tão iminente e o solo fica na zona mais suscetível a compactação.

O efeito do decréscimo de umidade no HB demonstra comportamento similar aos outros solos, conferindo grande resistência e baixo Cc.

Figura 36 – Índice de compressão estimado no NBCUR



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Maiores informações sobre as correlações entre a  $\sigma_p$  e Cc com outras propriedades físicas do solo, estão no apêndice B.

#### 4.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO (PROCTOR)

A tabela 16 está indicando os valores da  $\gamma_{dmáx}$  e Uoc em cada tipo de energia, foi iminente a diferenciação de cada solo, onde o solo que apresentou menor Uoc foi o NBCUR HA na energia modificada (E.M.) (29,2%) e o solo que apresentou maior Uoc foi o LVCN HB (39,6%) na energia normal (E.N.) então mesmo tratando de solos argilosos o comportamento hídrico de cada um é único diferenciando-os.

Tabela 16 – Massa específica aparente seca máxima e Umidade ótima a compactação de cada solo

Solo	$\gamma_{dmáx}$ E.N. (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{dmáx}$ E.I. (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{dmáx}$ E.M. (g/cm <sup>3</sup> )	Uoc E.N. (%)	Uoc E.I. (%)	Uoc E.M. (%)
<b>LBVAC HA</b>	1,344	1,361	1,437	31,1	30,1	30,7
<b>LBVAC HB</b>	1,383	1,408	1,427	29,9	32,5	31,2
<b>LVCN HA</b>	1,237	1,262	1,379	36,9	34,3	31,9
<b>LVCN HB</b>	1,259	1,372	1,409	39,6	32,7	32,5
<b>NBCUR HA</b>	1,32	1,376	1,472	36,0	33,2	29,2
<b>NBCUR HB</b>	1,345	1,373	1,433	35,2	32,8	31,6

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No ensaio de compactação o LBVAC HA apresentou pouca diferença entre a E.N. e energia intermediária (E.I.), indicando pontos bem próximos nas curvas, a  $\gamma_{dmáx} = 1,344$  g/cm<sup>3</sup> na E.N. ficou bem próximo da  $\gamma_{dmáx} = 1,361$  g/cm<sup>3</sup> na (E.I.), demonstrando que o solo mudará pouco entre as duas energias (figura 37a).

Na E.M. o solo se comportou diferente e alcançou valores mais expressivos de  $\gamma_d$  e mostrou-se mais denso, apresentando  $\gamma_{dmáx} = 1,437$  g/cm<sup>3</sup>, entre as três energias a Uoc praticamente não mudou.

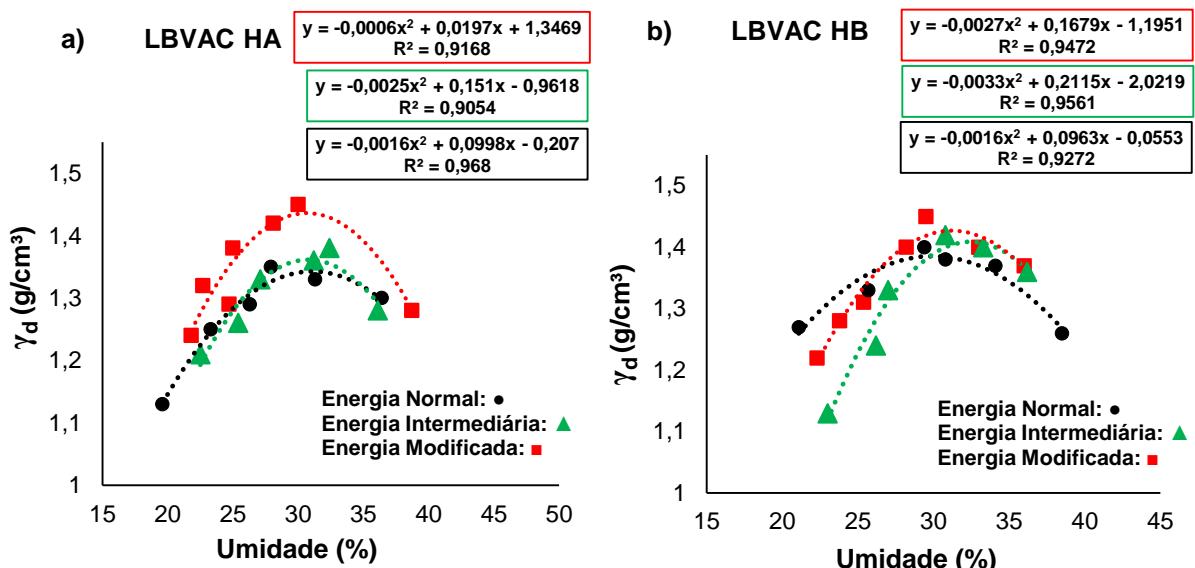
O LBVAC HB por sua vez demonstrou pouca diferença entre as energias, e dos solos avaliados foi o único que se comportou dessa forma, na E.N. apresentou valores parecidos de  $\gamma_{dmáx}$  com a E.I., ou seja, uma diferença muito pequena em termos de ganho de  $\gamma_d$ , na E.M. o solo chegou a  $\gamma_{dmáx} = 1,427$  g/cm<sup>3</sup> (figura 37b).

No LBVAC HB pode-se perceber que o incremento em grau de compactabilidade (GC) não foi iminente (figura 37b), os movimentos das curvas mostram uma superposta a outra, o que denota que o incremento de energia não altera em grande escala a deformação do solo, o alto teor de argila pode explicar esse fenômeno, pois as partículas são tão pequenas que rearranjam sua estrutura rapidamente.

O comportamento similar das curvas deve-se ao fato deste teor de argila presente no HB influenciar no processo físico-mecânico do solo, pois as camadas de argila atuam de modo a deixar sem efeito o ganho de energia, então mesmo adicionando maiores energias, o solo se comportará muito próximo de uma E.N.

Outro fator que pode contribuir é que a partir dos 80 cm de profundidade o solo apresenta uma estrutura muito dura, caracterizando um grau de resistência das partículas se submetida a algum esforço, conforme descrito no anexo A.

Figura 37 – Curvas de compactação (Proctor) do LBVAC nas energias (normal, intermediária e modificada)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As curvas de compactação do LVCN mostram um comportamento parecido nos dois horizontes, no HA o teste com E.N. resultou em uma  $\gamma_{dmáx} = 1,237 \text{ g/cm}^3$  na Uoc = 36,9%, similar ao encontrado por Andognini (2019) estudando o mesmo solo, em seus resultados encontrou valores de  $\gamma_{dmáx} = 1,248 \text{ g/cm}^3$  e de Uoc = 36,6%.

A mudança para a E.I. não gerou grande diferença, pois a  $\gamma_{dmáx} = 1,262 \text{ g/cm}^3$  é muito próximo ao encontrado na E.N. e a Uoc encontrada foi um pouco menor cerca de 34,3% (figura 38a).

Quando a E.M. é introduzida o solo tem grande ganho de  $\gamma_d$  e chega a valores próximo a  $1,40 \text{ g/cm}^3$ , usando a equação gerada no gráfico encontramos valores de  $\gamma_{dmáx} = 1,379 \text{ g/cm}^3$  na Uoc = 31,9%.

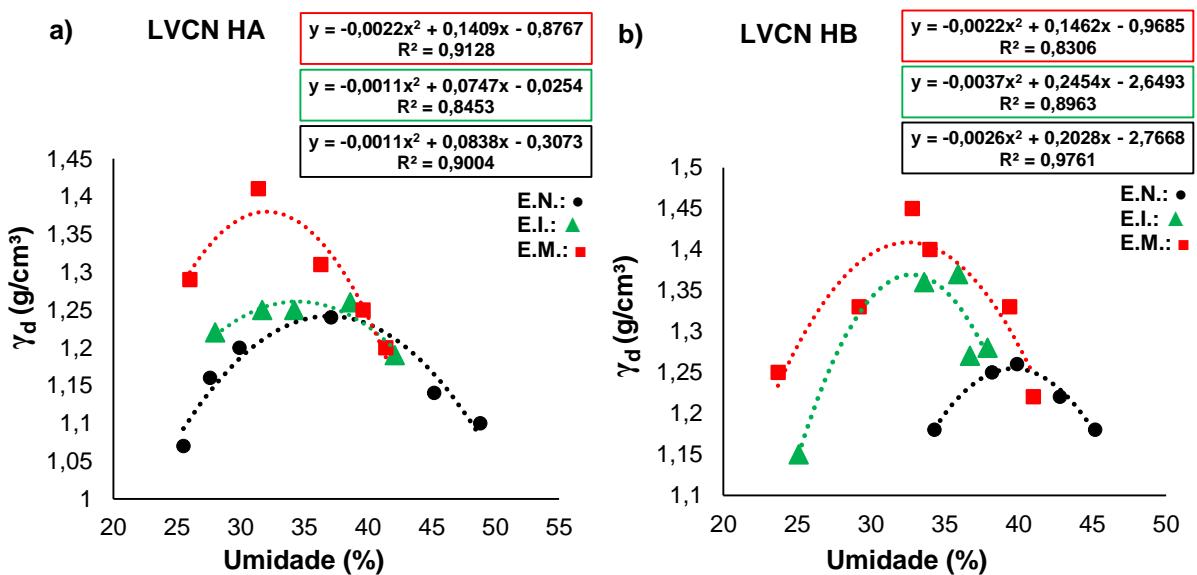
O comportamento do LVCN e NBCUR ambos HA foram similares, resultando em um GC = 11,47 e 11,51%, respectivamente de ganho em  $\gamma_d$ .

O LVCN HB tem comportamento distinto entre a E.N. e E.I., pois é iminente o ganho de  $\gamma_d$  na mudança de energia, onde na E.N. a  $\gamma_{dmáx} = 1,259 \text{ g/cm}^3$  ficou bem abaixo da curva da E.I. que apresentou  $\gamma_{dmáx} = 1,372 \text{ g/cm}^3$  valores próximos aos encontrados na E.M. onde a  $\gamma_{dmáx} = 1,409 \text{ g/cm}^3$  é bem similar a E.I., dando ênfase que o solo não foi tão suscetível a compactação com o incremento desta energia (figura 38b).

O solo que apresentou maior GC foi o LVCN HB com incremento de 11,91% de  $\gamma_d$  entre a energia modificada e a normal.

Os menores valores de GC foram entre a energia intermediária e a normal, onde quase todos os solos apresentaram pouca diferença em ganho de  $\gamma_d$  com exceção do LVCN HB que apresentou 8,97% em ganho de  $\gamma_d$ , comportamento este visto na figura 38b, onde a distância das curvas denota este incremento.

Figura 38 – Curvas de compactação (Proctor) do LVCN nas energias (normal, intermediária e modificada)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

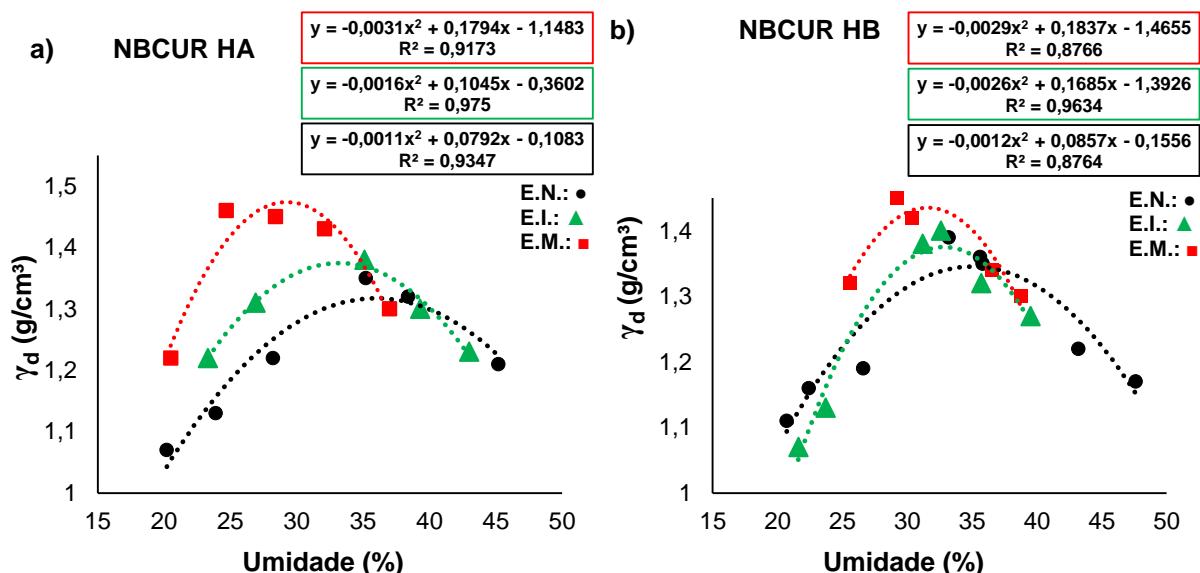
De acordo com a figura 39a, o NBCUR HA teve em suas curvas um movimento da direita para esquerda, onde conforme a energia cresce a umidade ótima diminui, comportamento este já esperado e similar ao encontrado nos trabalhos de outros autores.

Na E.N. foi encontrado a  $\gamma_{dmáx} = 1,32 \text{ g/cm}^3$ , porém com o acréscimo de energia a  $\gamma_{dmáx}$  ficou na casa dos  $1,376 \text{ g/cm}^3$ , já na E.M. o solo teve grande incremento de  $\gamma_d$  alcançando valores de  $\gamma_{dmáx} = 1,472 \text{ g/cm}^3$ .

Avaliando as curvas do HB é perceptível que o solo não tem uma grande resposta quando se aumenta a energia, comportamento similar ao encontrado no LBVAC HB, ou seja, na E.N. o maior ponto de  $\gamma_d$  está praticamente junto ao maior ponto encontrado na E.I., denotando que entre essas energias o solo tende a se comportar quase igual (figura 39b).

As curvas se comportam similarmente as do HA, gerando o movimento da direita para a esquerda com aumento de  $\gamma_d$  e perca de umidade para alcançar a Uoc. Na E.N. o  $\gamma_{dmáx} = 1,345 \text{ g/cm}^3$  foi observado aumentando-se a energia o  $\gamma_{dmáx}$  chega a  $1,433 \text{ g/cm}^3$  (E.M.).

Figura 39 – Curvas de compactação (Proctor) do NBCUR nas energias (normal, intermediária e modificada)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Em geral os solos se comportaram de maneira diferente conforme a compactação nas três energias, o GC dos solos está exposto na tabela 17.

Tabela 17 – Grau de compactabilidade entre as curvas de compactação

Energia do Protor	LBVAC HA	LBVAC HB	NBCUR HA	NBCUR HB	LVCN HA	LVCN HB
	Grau de Compactabilidade (%)					
Mod/Normal	6,91	3,18	11,51	6,54	11,47	11,91
Mod/Int	5,58	1,34	6,97	4,36	9,27	2,69
Int/Normal	1,2	1,80	4,24	2,08	2,02	8,97

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

#### 4.4 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR)

Em geral, para todos os solos o comportamento das curvas foi similar, evidenciando curvas pronunciadas com um teor de umidade na moldagem ( $U_m$ ) mais alto e uma  $\gamma_{dmáx}$  mais baixa do que em solos com fração textural maior em areia. Dal Pai (2005) ao avaliar um Cambissolo com 63,5% de areia, encontrou valores elevados de CBR = 45,4% na E.I. onde a  $U_m$  ficou em 8,85% e a  $\gamma_{dmáx}$  na casa dos 1,89 g/cm<sup>3</sup>. Os valores máximos de CBR variou de 10,04 a 17,96% e as expansões de 0,26 a 1,58% (tabela 18). Vargas (2021) ao estudar um Cambissolo húmico de Santa Catarina, encontrou valores de CBR = 11%, expansão de 2,2% na  $U_m$  = 21,58%.

Tabela 18 – Resultados máximos do Índice de suporte Califórnia

Variável	LBVAC HA	LBVAC HB	LVCN HA	LVCN HB	NBCUR HA	NBCUR HB
<b>CBR (%)</b>	14	17,96	14,3	10,04	15,84	15,32
<b>Expansão (%)</b>	1,58	0,27	0,67	0,26	0,38	1,15
<b><math>U_m</math>(%)</b>	29,9	33,19	33,45	37,67	30,8	28,61

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O LBVAC HA demonstrou um comportamento diferente dos outros solos, pois a expansão de 1,58% ficou acima do encontrado nos outros solos. Comportamento este que enfatiza que o material é expansivo mesmo após a compactação, caracterizando um material com resistência boa se usado em subleito, porém deve-se ter atenção com a umidade para ter uma expansão aceitável (figura 40a).

Esta foi a maior expansão em valores mais altos de CBR, então corrobora os resultados de (Silva, 2021) que verificou que este horizonte é o que apresenta maior retração do solo quando exposto a alta  $\Psi_m$  chegando a 47% de retração depois de seco em estufa, este pode se relacionar com a expansão, uma vez que depois de seco se o solo recebe um teor de umidade extremo, ele tenderá ao inchaço.

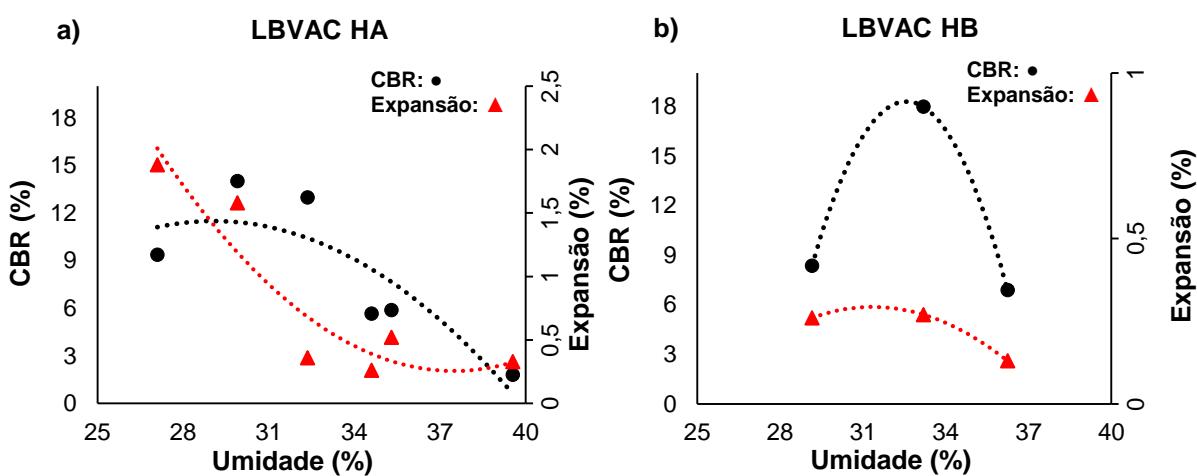
O LBVAC HB alcançou o maior valor de CBR = 17,96% e expansão de 0,27%, avaliando por estes critérios o solo apresenta bom desempenho se usado em pavimentos, mesmo apresentando o caráter retrátil, a expansão se mostrou baixa, e equipara a solos sem o caráter retrátil (figura 40b).

Dal Pai (2005) estudando um Cambissolo do HB enfatiza que mesmo o solo apresentando 52,5% de argila, LL = 66% e IP = 20% o solo apresenta boas condições para uso em pavimentos, onde os valores máximos empregados nas camadas são de

LL = 25% e IP = 6%, pois a classificação tradicional visa solos que tem pouca variação de volume nas curvas de secagem e umedecimento, tendo como base a retração e a expansão.

A autora ainda menciona que o solo apresentou expansão baixa (0,48%) e chegou a um CBR = 17,5% na  $U_m = 24,01\%$ , caracterizando um solo com aptidão em camadas de pavimentos, resultados similares ao encontrado com os solos retráteis.

Figura 40 – Curvas de expansão e Índice de Suporte Califórnia (CBR) do LBVAC



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nos resultados de Silva (2021) o LBVAC HB apresentou 29% de retração após seco em estufa, uma porcentagem bem menor se comparado ao HA, fator este que pode estar ligado ao teor de MOS presente no HA e a mineralogia do próprio solo.

Para alcançar valores maiores de CBR, pesquisadores usam a estabilização química, vale destacar que segundo a NLA - National Lime Association (2004), teor de MOS acima de 1% exige maior quantidade de cal para processos de estabilização química e procedimentos especiais para construção de pavimentos, fato este que deve ser levado em conta com os solos tropicais e subtropicais do Brasil, pois apresentam em sua grande maioria teores de 1 a 5% de MOS, e acima disso são considerados ricos em MOS.

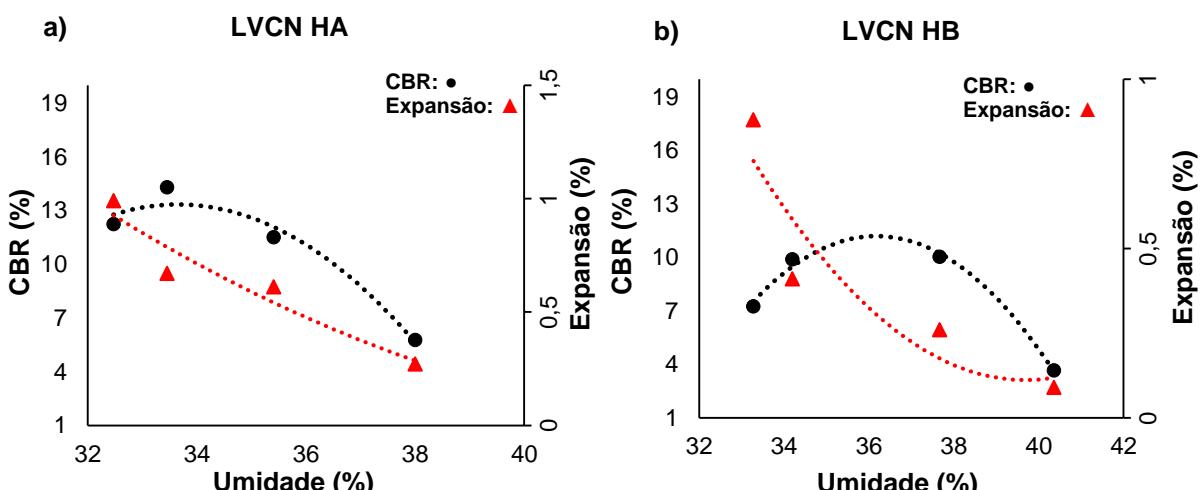
Os solos objeto de estudo apresentam teores médios de MO, segundo (CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990; PALADINI; MIELNICZUK, 1991; CAMPOS et al., 1995) a existência de MO no solo gera maior número de ligações entre as partículas minerais, tendo como consequência o crescimento da estabilidade dos agregados, maior força de retenção de água (SIDIRAS et al., 1984; CENTURION; DEMATTÉ,

1985), aumento da capacidade de troca cátions (CTC) (BAYER; MIELNICZUK, 1997), entre outras propriedades.

A MOS, diminui a densidade e o grau de compactação, porém, também aumenta a porosidade e, em algum grau, o espaço aéreo do solo quando ele é submetido à compactação pelo trânsito de máquinas (ARVIDSSON, 1998).

No LVCN HA o comportamento das curvas apresentaram diferenciação, segundo a figura 41a, o maior CBR = 14,30% apresentou uma expansão de 0,67% em uma Uoc = 33,45%, enfatizando que a expansão neste solo se pronuncia de menor magnitude, evidenciando um solo com característica boa para subleito, porém a amostra moldada e compactada a uma  $\theta_v = 32,47\%$  mensurou expansão de 0,99%, ou seja,  $\theta_v$  abaixo desse valor correspondem a expansões maiores que 1%, e podem acarretar danos patológicos em um pavimento.

Figura 41 – Curvas de expansão e Índice de Suporte Califórnia (CBR) do LVCN



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

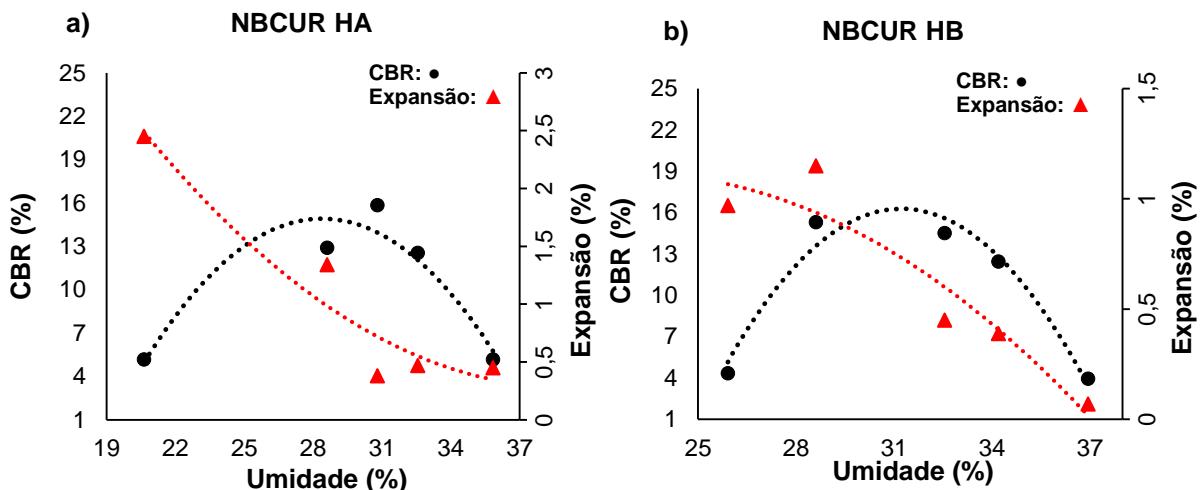
O valor de CBR no HA é maior que os encontrados no LVCN HB que apresentou um CBR = 10,04% e expansão de 0,26% em uma Uoc = 37,67% (figura 41b), outra vez a expansão se caracteriza menor, pois segundo (Silva, 2021) estes solos foram o que apresentaram menor retração chegando a 24 e 20% no HA e HB, respectivamente.

Estes solos por apresentarem coloração vermelha, demonstram forte aptidão de K e drenagem, no HB mesmo no ramo mais seco da curva o solo não apresentou uma expansão acentuada, e os valores chegaram a cerca de 0,88%.

Avaliando o NBCUR HA na figura 42a, observa-se que os comportamentos em

relação ao HB foram parecidos, estes solos apresentaram LL e LP bem próximas, onde o maior CBR = 15,84% obteve apenas 0,38% de expansão na Uoc = 30,8%, porém se a umidade diminuir um pouco já é iminente a expansão na casa dos 1,34%.

Figura 42 – Curvas de expansão e Índice de Suporte Califórnia (CBR) do NBCUR



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para verificar o comportamento do solo no ramo mais seco da curva, moldou-se um corpo de prova com umidade próxima aos 20%, então obteve-se uma expansão de 2,45%, comportamento este já esperado, ou seja, nestas condições a usabilidade do solo é inviável para subleito, pois teria uma movimentação grande da infraestrutura durante os dias secos e úmidos.

O solo teve maior capacidade de absorção de água na condição mais seca, em suma o solo se apresentou com bom comportamento, mas a umidade tem que ser próxima a Uoc = 30,8%, então este poderá ser usado em subleito, com um bom controle de umidade.

O NBCUR HB teve um CBR = 15,32% na Uoc de 28,61% mostrando comportamento similar na resistência perante o HA e a expansão subiu para 1,15% por estar em um teor de umidade menor, porém apresentou valores de CBR similares na faixa de 28,6 a 32,55% de umidade, onde nesta última apresentou um CBR = 14,52% e expansão de 0,45%, mensurando uma faixa de umidade ótima de compactação (figura 42b).

Para uma melhor avaliação da expansão destes solos, deve-se realizar ensaios edométricos com avaliação da histerese durante as curvas de secagem e umedecimento, pois estes podem apresentar grande pressão de expansão, ou seja,

neste trabalho comprovou-se que os solos compactados próximos da Uoc tem pouca expansão depois do corpo de prova ficar 96h submerso, isso denota que são solos que podem ser utilizados em subleito ou reforço de subleito, com um bom controle do subsolo por intermédio de ensaios SPT verificando se as camadas mais profundas não são mais frágeis.

## 5 CONCLUSÕES

A primeira hipótese do estudo se confirmou em parte, pois em condições de umidade volumétrica acima de 30%, o LBVAC HA apresentou a menor  $\sigma_p$  estimada entre todos os solos, embora não tenha apresentado os maiores valores de Cc.

A segunda hipótese, também, foi parcialmente confirmada, pois o LBVAC HA que detém maior teor de MOS, por sua vez apresentou os menores valores de  $\sigma_p$ , porém não denotou o maior Cc.

A terceira hipótese, também, foi parcialmente confirmada, onde os solos avaliados apresentaram um  $CBR \geq 2\%$  e expansão  $\leq 2\%$ , caracterizando possível uso em subleito, e como alguns solos chegaram a expansão  $\leq 1\%$ , estes podem ser usados como reforço de subleito.

Todos os solos não apresentaram um  $CBR \geq 20\%$  e expansão  $\leq 1\%$ , então não satisfazem a hipótese de serem usados em sub-base de pavimento, porém 4 dos solos apresentaram pouca expansão quando compactados na Uoc, onde o LBVAC HB se destacou por apresentar quase 18% de CBR e expansão = 0,27%, ou seja, denotando que mesmo apresentando o caráter retrátil o solo teve baixa expansão na Uoc, e para satisfazer valores  $\geq 20\%$  de CBR e expansão  $\leq 1\%$ , uma estabilização química pode ser adotada, gerando possível uso destes solos retráteis como sub-base.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na avaliação da compressibilidade dos solos, pode-se inferir que os mesmos são sensíveis quando expostos à tensão vertical (tráfego de veículos) principalmente quando o solo está na condição indeformada, onde a resistência mecânica é baixa para teores de umidade mais altos.

Sendo assim concluo que os solos apresentam menor capacidade de suporte quando estão na  $\Psi_m = 6 \text{ kPa}$ , e que a resistência tende a subir conforme ocorre a curva de secagem.

Os efeitos da retração do solo na  $\Psi_m > 500 \text{ kPa}$  podem acarretar alguns problemas as plantas tais como: crescimento limitado das raízes, pouca infiltração de água, diminuição da aeração, resistência mecânica alta, etc. Logo os estudos nas Ciências Agrárias remetem mais a essa problemática, por outro lado a Engenharia Geotécnica realiza mais estudos voltados para a expansão dos solos, pois esta propriedade remete a problemas estruturais e patológicos em obras de pavimentação, e edificações de pequeno e grande porte, por conta da movimentação de estruturas ocasionada pelos solos expansivos.

Em geral solos retráteis, também são expansivos, porém para mensurar o grau representativo, necessita-se de análises determinantes a fim de delimitar se o solo é mais retrátil ou mais expansivo durante as curvas de secagem e umedecimento (histerese).

Os métodos empregados pela metodologia MCT para verificar a contração, os ensaios triaxiais e de cisalhamento também podem ser indicadores do comportamento físico destes solos e podem ser úteis em pesquisas futuras. Os ensaios edométricos elecandos no quadro 4 são de grande valia para o maior entendimento destes solos, pois gera parâmetros da resistência do solo saturado e da pressão de expansão com ênfase no adensamento primário e secundário (que depende unicamente do tempo para dissipar o excesso de poropressão e o recalque acontecer).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMINI, F.** **Potential Applications of Dynamic and Static Cone Penetrometers in MDOT Pavement Design and Construction.** Final Report-Jackson State University. Jackson, Mississippi, 2003.
- AMORIM, S. F.** **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC-PE).** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2004.
- ANDOGNINI, J.** **Efeito do grau de compactação nos atributos físicos de solos de Santa Catarina e nas características produtivas e nutritivas da aveia-preta.** Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2019.
- ARVIDSSON, J.** Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory experiments. **Soil Tillage Res.**, 49:159-170, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6457:** Amostra de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6459:** Solo: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7180:** Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7181:** Solo: Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7182:** Solo: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9895:** Solo: Índice de suporte Califórnia (ISC): Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16853:** Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- BARBOSA, V.H.R.; MARQUES, M.E.S.; GUIMARÃES, A.C.R. Caracterização mineralógica de um solo do Acre visando à produção de agregados artificiais de Argila Calcinada para uso em pavimentos. **Revista Matéria**, v.23, n.3, 2018.
- BARBOSA, V. H. R.; MARQUES, M. E. S.; GUIMARÃES, A. C. R., et al., Avaliação do Potencial expansivo de solos da Formação Solimões no Estado do

Acre para uso em Pavimentação. **Revista Matéria**, v.27, n.2, 2022

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Nitrogênio total de um solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. **R. Bras. Ci. Solo**, 21:235-239, 1997.

BOONE, F.R.; VEEN, B.W. **Mechanisms of crop responses to soil compaction**. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Ed). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994.

BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Área de concentração Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo. Santa Maria, 2004.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SEQUINATTO, L. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:477-485, 2008.

CAMPOS, B.C. DE; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C.. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 19:121-126, 1995.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 3<sup>a</sup> Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1975. Volume 1.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, 14:99-105, 1990.

CARVALHO, R. G. **Correlações entre os ensaios DCP e CBR para solos saprolíticos de textura fina**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.

CASAGRANDE, A. **Classification and Identification of Soils**. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 113, 901-930, 1948.

CASAGRANDE, A. **Determination of the preconsolidation load and its practical significance**. In: International Conference on the Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1936, Cambridge. Proceedings Cambridge, Harvard University, 1936.

CASAGRANDE, A. Research on the Atterberg Limits of Soils. **Public Roads**, Vol 13. No 8. pp 121 – 136, 1932.

CENTURION, J.F.; DEMATTÊ, J.L.I; FERNANDES, F.M. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades químicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **R. Bras. Ci. Solo**, 9:267-270, 1985.

CHAGAS, G. D. S.; MOURA, A. S.; CARNEIRO, A. D. A. Avaliação da compactação como melhoramento de um solo silto, argiloso, colapsível, um partidor da realização

de ensaios oedometricos e provas de carga diretas. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, vol. 6, n. 1, p. 3-19, Janeiro-Junho 2019 - ISSN 2358-6508.

**COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM) - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapas Geológicos da Região Costeira do Rio Grande do Sul. Porto Alegre**, CPRM/UFRGS. Escala 1:250.000, 2000.

**COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM) - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa geológico do estado de Santa Catarina**. Escala 1:500.000. Porto Alegre, 2014.

**DAL PAI, C.M. Investigação de Vias Urbanas Empregando o Método das Pastilhas e o Penetrômetro Dinâmico de Cone – DCP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

**DAY. P.** Particle fractionation and particle-size analysis. In: Black C.A. (ed.). Methods of soil analysis. **Physical and mineralogical methods**. 2.ed. Madison. Ame. Soc.of Agronomy. 1965.

**DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE. F.J.** A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technol.** 8:139-51, 1995.

**DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J.** O processo de compactação do solo e sua modelagem. **R. Bras. Ci. Solo**, 20:175-182, 1996.

**DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT IPR 719:** Manual de pavimentação. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

**DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. NORMA DNIT 172/2016 - ME:** Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2016.

**EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 2 ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

**EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA.** Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Guia de excursão de estudos de solos nos estados do Rio Grande do Sul. Santa Catarina e Paraná**. Embrapa Florestas. 2000.

**FERREIRA, S. R. M. Colapso e expansão em solos naturais não saturados devidos a inundação.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 1995.

**FIROOZI, A. A.; FIROOZI, A. A.; BAGHINI, M. S.** A review of clayey soils. **Asian Journal of Applied Sciences** (ISSN: 2321 – 0893) v. 04, p. 1319 – 1330, 2016.

**FONTES, L. P. T. DA L. Contribuição à investigação geotécnica de vias urbanas não pavimentadas através do emprego do penetrômetro dinâmico de cone.**

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2001.

FREDLUNG, D. G.; XING, A. & HUANG, S. Predicting the permeability functions for unsaturated soil using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, nº 4, p. 533 – 546, 1994.

**FREITAS, J. A. S. de. Compressibilidade e suscetibilidade à compactação de um latossolo vermelho sob diferentes condições de preparo e manejos.**

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal da Fronteira Sul, 2015.

FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P. **Compactação do solo.** 2016. Disponível em: <http://www.fcav.unesp.br/Home/departamentos/engenhariarural/CARLOSEDUARDOANGELIFURLANI/compactacao.pdf>. Acesso em 15/03/2023

Gaspari, M. C., Pontelli, M. E., & Biffi, V. H. R. (2020). Natureza poligenética de latossolo Bruno em patamares extensos no Meio-Oeste catarinense–Planalto das Araucárias. **Geografia Ensino & Pesquisa**, 24, 23.

GUBIANI, P. I. et al., Relação entre densidade do solo e conteúdo de água em repetidos ciclos de contração e expansão em um Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.100-108, 2015.

GUBIANI, P. I. et al., EXCEL ADD-IN TO MODEL THE SOIL COMPRESSION CURVE. **Engenharia Agrícola**, 37(3), 603-610, 2017

HOLTZ, R.D.; KOVACS, W.D. **An introduction to geotechnical engineering.** New Jersey, Prentice-Hall, 733 p. 1981.

KAMIMURA, K.M.; SANTOS, G.R.; OLIVEIRA, M.S.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G. Spatial variability of the physical properties of a Red Yellow Latosol under coffee. **R Bras Ci Solo**. 37:877-88. 2013.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **R. Bras. Ci. Solo**, 23:211-218, 1999.

LAL, R. Forest soils and carbon sequestration. **For. Ecol. Manag.**, 220:242-258, 2005.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 6, p. 1127-1132, 1980.

LIMA, V. C. et al. **O solo no meio ambiente: abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio.** Universidade Federal do Paraná. Departamento de Solos e Engenharia Agrícola. 2007.

LUCIANO. R.V. et al. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no Sul do Brasil. vol. 36 **R. Bras. Ciê. do Solo.** 2012.

MACHADO, C. C.; LIMA, D. C.; CARVALHO, C. A. B. Pavimentação. In: MACHADO, C.C. **Construção e Conservação de Estradas Rurais e Florestais.** Viçosa: UFV, p. 83 – 252. 2013.

MARANGON, M. **Mecânica dos Solos II, Ed. Dez/2018. Capítulo 3 – Compressibilidade e Adensamento dos Solos.** Universidade Federal de Juiz de Fora. Faculdade de Engenharia – NuGeo/Núcleo de Geotecnia. 2018. Disponível em:  
<http://www.ufjf.br/nugeo/files/2013/06/MARANGON-M.-Dez-2018-Cap%C3%ADtulo-03-Compressibilidade-e-Adensamento-dos-Solos.pdf>. Acesso em 15/03/2023

MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T.; BARBIERI, D.M. Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar por longo período. **R. Biol. Ci. Terra**, 8:125-143, 2008.

NLA - NATIONAL LIME ASSOCIATION. **Lime-Treated Soil Construction Manual, Lime Stabilization & Lime Modification**, ed. 3, bulletin 326, Virginia, USA, 2004.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. 1981. In **Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia**, Rio de Janeiro. 1981.

OLIVEIRA, G. C., DIAS JUNIOR, M. S., CURTI, N., & RESCK, D. V. S. (2003). Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, 27(5), 773–781. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500001>

PAIGE-GREEN, P.; DU PLESSIS, L. Use and interpretation of the dynamic cone penetrometer (DCP) test. **CSIR Built Environment Pretoria**, v2, 2009.

PALADINI, F.L.S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistema de culturas. **R. Bras. Ci. Solo**, 15:135-140, 1991.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada.** Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica. São Carlos, 2004.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** São Paulo: Oficina de Textos, e. 3. 2006.

REICHERT, J.M. et al. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I - Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 26. 1-8.

10.1590/S0100-06832002000100001. 2002.

REICHERT, J. M. et al. **Solos Florestais**. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

RESENDE, L. R. M.; OLIVEIRA FILHO, W. L.; NOGUEIRA, C. L. Use of the DCP test for compaction control of staged dikes in mining tailings dams. **Revista Escola de Minas**, v. 66, n.4, p. 493-498, out. 2013.

SALTON, J. C. **Sistema Plantio Direto**. O produtor pergunta, a Embrapa responde / Organizado por Júlio César Salton; Luis Carlos Hernani; Clarice Zanoni Fontes. – Brasília : Embrapa-SPI ; Dourados: Embrapa-CPAO, 1998. 248p.

SAMPAIO, I. S. **Estabilização enzimática de solo para pavimento de estradas florestais**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. 2019. Disponível em:  
<https://locus.ufv.br/handle/123456789/24811>. Acesso em 05 junho 2021.

SANTANA, M.; AZARIAS, V. **Solos do Brasil: Latossolos**. 2021. Disponível em:  
<https://parquecientec.usp.br/publicacoes/solos-do-brasil-latossolos>. Acesso em 09/03/2023.

SANTANA, M.; AZARIAS, V. **Solos do Brasil: Nitossolos**. 2021. Disponível em:  
<https://www.parquecientec.usp.br/publicacoes/solos-do-brasil-nitossolos> Acesso em 09/03/2023

SANTOS, H. G. D. et al., **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. Embrapa. Brasília – DF. 2018

SANTOS, J. A. **Compactação Elementos Teóricos**. 2008. 18p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior Técnico. Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura

SANTOS, M. N. **Análise do efeito da estabilização mecânica em matrizes de terra**. 2012. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, 2012. Disponível em:  
[http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio\\_resumo2012/relatorios\\_pdf/ctc/CIV/CIV-Monique%20Nascimento%20dos%20Santos.pdf](http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2012/relatorios_pdf/ctc/CIV/CIV-Monique%20Nascimento%20dos%20Santos.pdf). Acesso em 15 agosto 2020.

SCHAFER, W.M. AND SINGER, M.J. 1976. A new method of measuring shrink-swell potential using soil pastes. Vol. 40 **Soil Sci. Soc. Am. J.**

SIDIRAS, N.; VIEIRA, S.R.; ROTH, C.H. Determinação de algumas características físicas de um Latossolo Roxo distrófico sob plantio direto e preparo convencional. **R. Bras. Ci. Solo**, 8:265-268, 1984.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. **VII-Indicadores da Qualidade Física do Solo**. Viçosa: Quirijn de Jong Van Lier, 2010.

SILVA, A.R.; DIAS JUNIOR, M.S.; LEITE, F. P. Camada de resíduos florestais e

pressão de preconsolidação de dois latossolos. **Pesq. Agropec. Bras.**, 42:89-93, 2007.

SILVA, J. A. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo potencialmente expansivo, encontrado em Agrestina/PE, aplicando cinza de casca de arroz e cal como aditivos estabilizantes**. 2018. 137p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Caruaru, 2018.

SILVA, L. **Caráter retrátil de Nitossolos e Latossolos do Sul do Brasil**. 2015. 128p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2015.

SILVA, L. **Retração do solo e relação com as propriedades físico-hídricas de Latossolos e Nitossolos do Sul do Brasil**. 2019. 109p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2019.

SILVA L, SEQUINATTO L, ALMEIDA JA, BORTOLINI D. Methods for quantifying shrinkage in Latossolos (Ferralsols) and Nitossolos (Nitisols) in Southern Brazil. **Rev Bras Cienc Solo**. 2017;41:e0160364.

SILVA, M. J. R. **Comportamento Geomecânico de Solos Colapsíveis e Expansivos em Petrolina: Cartas de Suscetibilidade**. 2003. 111p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

SILVA, R.B.; LANÇAS, K.P.; MASQUETTO, B.J. Consolidômetro: Equipamento pneumático-eletrônico para avaliação do estado de consolidação do solo. **R Bras Ci Solo**. 31:617-625, 2007.

SILVA, R.B.; MASQUETTO, B.J.; LANÇAS, K.P.; SILVA, F.A.M. Desenvolvimento, automação e desempenho de um consolidômetro com interface homem-máquina. **R Bras Ci Solo**. 39:416-427, 2015.

SILVA, V. R., REINERT, D. J., & REICHERT, J. M. Suscetibilidade à compactação de um latossolo vermelho-escuro e de um podzólico vermelho-amarelo. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, 24(Rev. Bras. Ciênc. Solo, 2000 24(2)), 239–249. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000200001>

SKEMPTON, A., “**The colloidal activity of clays**”, 1953.

SIRIVITMAITRIE, C., PUPPALA, A. J., CHIKYALA, V., SARIDE, S. & HOYOS, L. R., “Combined lime and cement treatment of expansive soils with low to medium soluble sulfate levels”, **American Society of Civil Engineers**, Proceedings of the Geo Congress, pp. 646-653, 2008.

SOANE, B. D. The role organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, v.16, p.179-201, 1990.

SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C., eds. **Soil compaction in crop production**. Amesterdam, Elsevier, 1994. p. 1-21.

SOBREIRA, D. S. V. et al. Estudo comparativo entre os métodos de compactação de solos por impacto e amassamento, 2018. **Geociências**, UNESP, São Paulo, v. 37, n. 3, p. 683 - 693, 2018.

SOKALSKI, T.N. **Correlação entre os ensaios CBR e DCP para solos argilosos residuais basálticos**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Maringá – Unicesumar, 2021.

SOUZA, B. M. M. D. **Estudo de correlação entre os índices de DCP e CBR de solos típicos da cidade de Natal/RN**. 2019. 88p. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2019.

STEPNIEWSKI, W.; HORNN, R.; MARTYNIUK, S. Managing soil biophysical properties for environmental protection. **Agr. Ecossyst. Environ.** 88:175-181, 2002.

TESTONI, S. A. **Mineralogia da fração argila de Latossolos e Nitossolos Brunos com caráter retrátil**. 2015. 155p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2015.

TESTONI, S. A., ALMEIDA, J. A. DE ., SILVA, L. DA ., & ANDRADE, G. R. P.. (2017). Clay Mineralogy of Brazilian Oxisols with Shrinkage Properties. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, 41, e0160487.  
<https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160487>

UNITED STATES ARMY ENGINEER MANUAL. **EM 1110-2-1906**. Laboratory Soils Testing. Washington; 1970.

VAN GENUCHTEN, M. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci.**44, 5, 892-898. (1980).

VARELA, G. G. T. **Solos expansivos no Brasil: uma revisão sistemática**. 2021. 89p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Campina Grande, 2021.

VARGAS, D. A. D. **Comportamento mecânico de um solo tratado com estabilizantes químicos para pavimento de estrada florestal**. 2021. 90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2021.

VARGAS, M.; GONÇALVES, H.H.; SANTOS, N.B. & MARINHO, F.A.M. (1989), **Expansive soils in Brazil. Supplementary Contributions by the Brazilian Society for Soil Mechanics**. 12<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and

Foundation Engineering, Rio de Janeiro, pp.77-81

VILAR, O.M., FERREIRA, S.R.M., "**Solos colapsíveis e expansivos**", In: Solos não saturados no contexto geotécnico, 1 ed., capítulo 15, São Paulo, ABMS, 2015

WILLIAMS, A. A. B. & DONALDSON, G. W. (1980). **Building on expansive soils in South Africa: 1973 – 1980.** Proceedings 4<sup>th</sup> International Conference on Expansive Soils, Vol. II, Denver, Colorado, p. 834-844.

ZHANG, H.; HARTGE, K.H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 61:239-245. 1997.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – GRAU DE COMPACTAÇÃO DOS SOLOS

Grau de Compactação % Energia Normal	LBVAC HA	LBVAC HB	NBCUR HA	NBCUR HB	LVCN HA	LVCN HB
	Densidade do Solo (g/cm <sup>3</sup> )					
<b>70%</b>	0,941	0,968	0,924	0,942	0,866	0,881
<b>75%</b>	1,008	1,037	0,99	1,009	0,928	0,944
<b>80%</b>	1,075	1,106	1,056	1,076	0,99	1,007
<b>85%</b>	1,142	1,176	1,122	1,143	1,051	1,07
<b>90%</b>	1,21	1,245	1,188	1,211	1,113	1,133
<b>95%</b>	1,277	1,314	1,254	1,278	1,175	1,196
<b>100%</b>	1,344	1,383	1,32	1,345	1,237	1,259
<b>105%</b>	1,411	1,452	1,386	1,412	1,299	1,322

**APÊNDICE B – Correlação de Spearman entre as propriedades e parâmetros físicos obtidos para os solos avaliados.**

	UV	$\gamma_d$	ppc	Cc	ARGILA	SILTE	AREIA	LL	LP	IP	PT	MOS	IR-C	IR-M	IR-A	IR-T
<b>UV</b>		0,4642	-0,2761	-0,3691	0,4473	-0,2393	-0,3124	-0,0633	0,1738	-0,2044	-0,2376	-0,1257	0,1926	0,2445	0,0103	0,0686
		(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)
		<b>0,0000</b>	<b>0,0004</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0022</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,4176</b>	<b>0,0261</b>	<b>0,0089</b>	<b>0,0023</b>	<b>0,1074</b>	<b>0,0136</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,8950</b>	<b>0,3797</b>
<b><math>\gamma_d</math></b>	0,4642		0,1004	-0,8546	0,7782	-0,5429	-0,3752	0,1193	0,4403	-0,4067	-0,3762	-0,3583	0,3170	0,2096	-0,1865	-0,0589
	(165)		(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)
	<b>0,0000</b>		<b>0,1986</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,1264</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0073</b>	<b>0,0169</b>	<b>0,4509</b>
<b>ppc</b>	<b>-0,2761</b>	0,1004		0,1980	0,0510	-0,0221	-0,0118	0,0035	-0,1068	0,1146	-0,1624	-0,1976	-0,1312	-0,0964	-0,2214	-0,1670
	(165)	(165)		(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)
	<b>0,0004</b>		<b>0,1986</b>	<b>0,0112</b>	<b>0,5138</b>	<b>0,7770</b>	<b>0,8800</b>	<b>0,9644</b>	<b>0,1715</b>	<b>0,1422</b>	<b>0,0375</b>	<b>0,0114</b>	<b>0,0928</b>	<b>0,2168</b>	<b>0,0046</b>	<b>0,0324</b>
<b>Cc</b>	-0,3691	<b>-0,8546</b>	0,1980		-0,7144	0,5524	0,3073	-0,1023	-0,3755	0,3178	0,3741	0,3254	-0,2860	-0,2083	0,1211	0,0547
	(165)	(165)	(165)		(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)
	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0112</b>		<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,1902</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0002</b>	<b>0,0076</b>	<b>0,1208</b>	<b>0,4835</b>
<b>ARGILA</b>	0,4473	0,7782	0,0510	-0,7144		-0,6046	-0,6037	-0,0084	0,3364	-0,3525	-0,6130	-0,4030	0,3915	0,3784	-0,1110	-0,0467
	(165)	(165)	(165)	(165)		(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)
	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,5138</b>	<b>0,0000</b>		<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,9142</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,1550</b>	<b>0,5496</b>
<b>SILTE</b>	-0,2393	-0,5429	-0,0221	0,5524	-0,6046		-0,2470	-0,2782	-0,4178	0,0641	0,4346	0,6448	0,0506	0,0367	0,3589	0,2716
	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)		(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)
	<b>0,0022</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,7770</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>		<b>0,0016</b>	<b>0,0004</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,4118</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,5169</b>	<b>0,6387</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0005</b>
<b>AREIA</b>	-0,3124	-0,3752	-0,0118	0,3073	-0,6037	-0,2470		0,4517	0,0395	0,3366	0,3128	-0,2163	-0,4823	-0,6638	-0,3590	-0,3772
	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)		(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)
	<b>0,0001</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,8800</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0016</b>		<b>0,0000</b>	<b>0,6128</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0056</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>
<b>LL</b>	-0,0633	0,1193	0,0035	-0,1023	-0,0084	-0,2782	0,4517		0,5571	-0,3433	0,2987	-0,1525	0,3644	-0,7812	-0,4013	-0,6098
	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)		(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)
	<b>0,4176</b>	<b>0,1264</b>	<b>0,9644</b>	<b>0,1902</b>	<b>0,9142</b>	<b>0,0004</b>	<b>0,0000</b>		<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0508</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>
<b>LP</b>	0,1738	0,4403	-0,1068	-0,3755	0,3364	-0,4178	0,0395	0,5571		-0,8927	0,4702	0,2331	0,7129	0,0298	0,2256	0,2077
	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)		(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)
	<b>0,0261</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,1715</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,6128</b>	<b>0,0000</b>		<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0028</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,7029</b>	<b>0,0039</b>	<b>0,0078</b>
<b>IP</b>	-0,2044	-0,4067	0,1146	0,3178	-0,3525	0,0641	0,3366	-0,3433	-0,8927		-0,5154	-0,4980	-0,8915	-0,2546	-0,4552	-0,4188
	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)		(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)
	<b>0,0089</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,1422</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,4118</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>		<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0011</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>
<b>PT</b>	-0,2376	-0,3762	-0,1624	0,3741	-0,6130	0,4346	0,3128	0,2987	0,4702	-0,5154		0,7923	0,3932	-0,1100	0,5234	0,4193
	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)		(165)	(165)	(165)	(165)	(165)
	<b>0,0023</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0375</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>		<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,1589</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>
<b>MOS</b>	-0,1257	-0,3583	-0,1976	0,3254	-0,4030	0,6448	-0,2163	-0,1525	0,2331	-0,4980	0,7923		0,5405	0,3750	0,8839	0,7342
	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)		(165)	(165)	(165)	(165)
	<b>0,1074</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0114</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0056</b>	<b>0,0508</b>	<b>0,0028</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>		<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>

<b>IR-C</b>	0,1926	0,3170	-0,1312	-0,2860	0,3915	0,0506	-0,4823	0,3644	0,7129	-0,8915	0,3932	0,5405		0,2177	0,5087	0,2975
	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)		(165)	(165)	(165)
	<b>0,0136</b>	<b>0,0000</b>	0,0928	<b>0,0002</b>	<b>0,0000</b>	0,5169	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>		<b>0,0053</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0001</b>
<b>IR-M</b>	0,2445	0,2096	-0,0964	-0,2083	0,3784	0,0367	-0,6638	-0,7812	0,0298	-0,2546	-0,1100	0,3750	0,2177		0,7050	0,8486
	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)		(165)	(165)	(165)
	<b>0,0017</b>	<b>0,0073</b>	0,2168	<b>0,0076</b>	<b>0,0000</b>	0,6387	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	0,7029	<b>0,0011</b>	0,1589	<b>0,0000</b>	<b>0,0053</b>		<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>
<b>IR-A</b>	0,0103	-0,1865	-0,2214	0,1211	-0,1110	0,3589	-0,3590	-0,4013	0,2256	-0,4552	0,5234	0,8839	0,5087	0,7050		0,8957
	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)		(165)	(165)	(165)
	<b>0,8950</b>	<b>0,0169</b>	<b>0,0046</b>	0,1208	0,1550	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0039</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	
<b>IR-T</b>	0,0686	-0,0589	-0,1670	0,0547	-0,0467	0,2716	-0,3772	-0,6098	0,2077	-0,4188	0,4193	0,7342	0,2975	0,8486	0,8957	
	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)	(165)		(165)	(165)	(165)
	0,3797	0,4509	<b>0,0324</b>	0,4835	0,5496	<b>0,0005</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0078</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	

Elaborado pelo autor (2023)

UV – Umidade volumétrica

ppc – Pressão de pré-consolidação

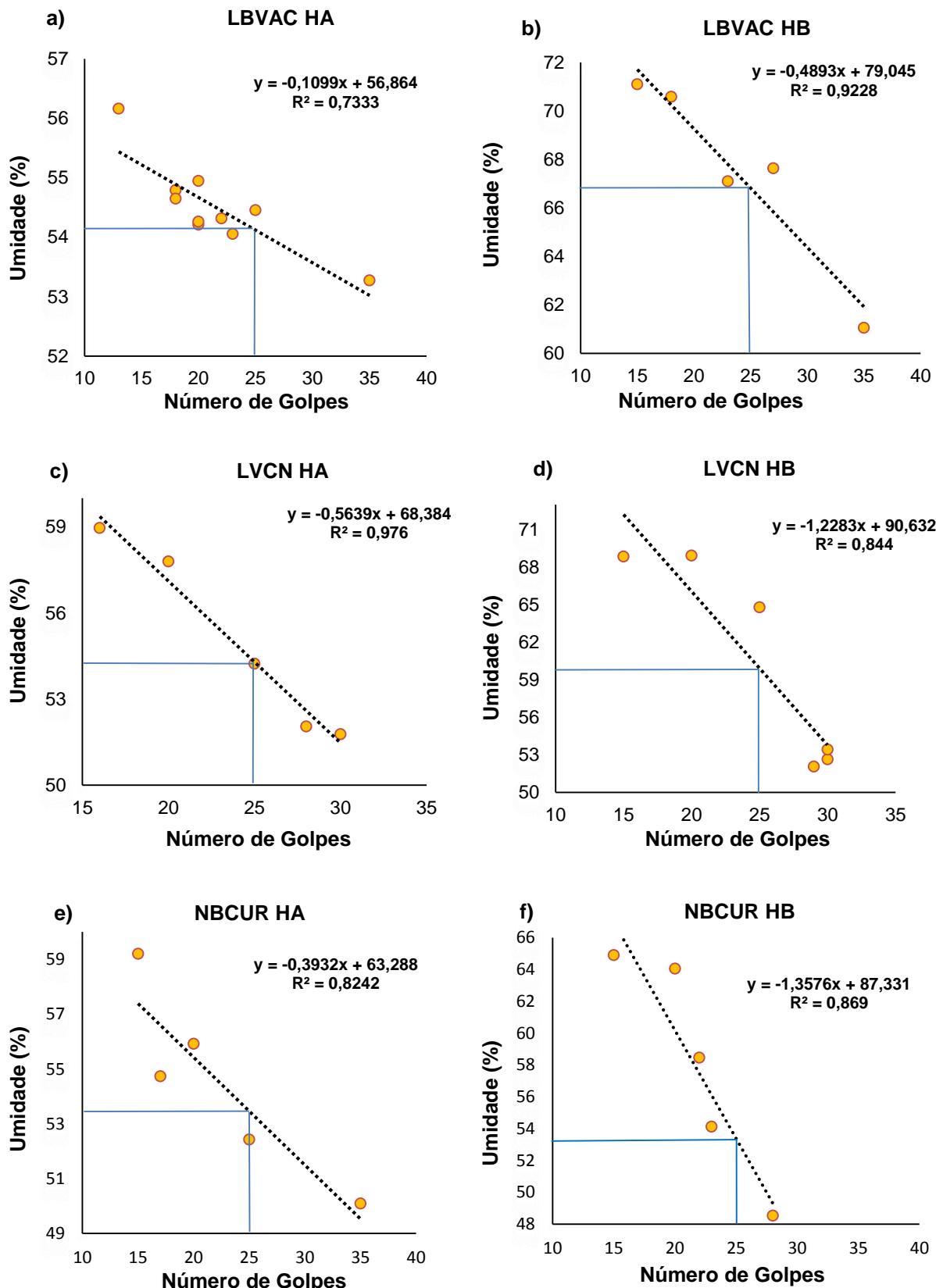
IR-C – Índice de retração cole modificado

IR-M – Índice de retração mercúrio metálico

IR-A - Índice de retração anel com areia

IR-T - Índice de retração tese (sucção matricial e secagem em estufa)

## APÊNDICE C – GRÁFICOS DOS LIMITES DE LIQUIDEZ DOS SOLOS



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

## ANEXOS

### **ANEXO A – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – LBVAC**

DATA: 13/10/1999

CLASSIFICAÇÃO ANTERIOR: LATOSSOLO BRUNO ÁLICO epidistrófico A proeminente textura muito argilosa

CLASSIFICAÇÃO ATUAL: LATOSSOLO BRUNO Distrófico típico

LOCALIZAÇÃO: cerca de 5 km de Vacaria na estrada para Bom Jesus, 550 metros além da entrada para a Unidade do Centro de Uva e Vinho da Embrapa, barranco do lado direito.

COORDENADAS: 28°30'47.40"S; 50°53'36.90"W

SITUAÇÃO NA PAISAGEM: terço superior de encosta com 5% de declive

ALTITUDE: 1000 m

LITOLOGIA E FORMAÇÃO GEOLÓGICA: rochas basálticas do Grupo São Bento, Juro-Cretáceo.

MATERIAL ORIGINÁRIO: produtos de alteração das rochas acima mencionadas

RELEVO LOCAL: suave ondulado

RELEVO REGIONAL: suave ondulado e ondulado

EROSÃO: não aparente

DRENAGEM: bem a acentuadamente drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: campo subtropical

USO ATUAL: pastagem

DESCRITO E COLETADO: Gustavo Ribas Curcio, Américo Pereira de Carvalho, Márcio Rossi, Jaime Antônio de Almeida e Maurício Rizzato Coelho,

### **DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA**

**A1** – 26 cm; bruno-escuro (8,5YR 3/3), bruno a bruno-escuro (8,5YR 4/2, seco); muito argilosa; moderada grande a pequena, blocos subangulares que se desfaz em moderada a forte pequena e muito pequena granular; ligeiramente dura, friável a firme, plástica e pegajosa; transição gradual e plana,

**A2** – 44 cm; bruno-escuro (8,5YR 3/3,5), bruno a bruno-escuro (8,5YR 4/2, seco); muito argilosa; moderada pequena e média blocos subangulares que se desfaz em moderada a forte pequena e muito pequena granular; dura, friável, plástica e pegajosa; transição clara e plana,

**AB** – 65 cm; bruno a bruno-escuro (8,5YR 4/3, úmido e seco); muito argilosa; moderada grande blocos subangulares que se desfaz em moderada a forte pequena e muito pequena granular; dura, friável, plástica e pegajosa; transição clara e plana,

**BA** – 80 cm; bruno a bruno-escuro (7,5YR 4/4); muito argilosa; fraca a moderada grandes blocos subangulares que se desfaz em moderada pequena e muito pequena granular; muito dura, friável a firme, plástica e pegajosa; transição clara e plana,

**Bw1** – 100 cm; bruno-forte (7,5YR 4/6); muito argilosa; fraca grande blocos subangulares que se desfaz em moderada pequena e muito pequena granular; muito dura, friável, ligeiramente plástica e pegajosa; transição difusa e plana,

**Bw2** – 130 cm; bruno-avermelhado (6,0YR 4/4); muito argilosa; fraca grande blocos subangulares que se desfaz em moderada pequena e muito pequena granular; muito dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa a pegajosa; transição difusa e plana,

**Bw3** – 177 cm; vermelho-amarelado (5YR 4/6); muito argilosa; fraca grande blocos subangulares que se desfaz em moderada muito pequena e pequena granular; muito dura, friável a firme, ligeiramente plástica e pegajosa; transição difusa e plana,

**Bw4** – 220 cm+; bruno-forte (7,5YR 4/6); muito argilosa; fraca grande blocos subangulares que se desfaz em moderada pequena e muito pequena granular; muito dura, friável a firme, ligeiramente plástica e pegajosa,

**RAÍZES:** A1 – muitas fasciculadas finas e médias; A2 – muitas a comuns fasciculadas finas; AB – comuns finas; BA, Bw1 e Bw2 – poucas finas; Bw3 e Bw4 – raras finas,

**POROS:** A1 e A2 – muitos muito pequenos e pequenos comuns médios; AB – muitos muito pequenos e pequenos, comuns médios, poucos grandes; BA – muitos muito pequenos e pequenos, poucos médios e grandes; Bw1 – muitos muito pequenos e pequenos, comuns médios; Bw2 – muitos muito pequenos e pequenos, comuns médios, poucos grandes; Bw3 e Bw4 – comuns pequenos e muito pequenos, poucos médios.

## **ANEXO B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – LVCN**

DATA – 24/07/99,

CLASSIFICAÇÃO ATUAL – Latossolo Vermelho Distrófico retráctico úmbrico,

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO - Rodovia BR-470, trecho Campos Novos - Curitibanos, a 13,2Km após o trevo principal de acesso a Campos Novos e a cerca de 2km antes do trevo para São José do Cerrito, em barranco do lado direito da rodovia, Município de Campos Novos, SC,

COORDENADA – 27°22'34.93" S 51°05'26.92" W

SITUAÇÃO, DECLIVE e COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - Coletado em barranco de corte de estrada, topo de elevação, com área de relevo suave ondulado, cerca de 6% de declive, sob vegetação de campo nativo,

ALTITUDE - 939m,

LITOLOGIA – Basalto,

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Serra Geral,

MATERIAL ORIGINÁRIO – Produtos de alteração do basalto, CRONOLOGIA – Jurássico Triássico, Grupo São Bento, PEDROGOSIDADE – Não pedregoso,

ROCHOSIDADE - Não rochoso,

RELEVO LOCAL – Suave ondulado,

RELEVO REGIONAL – Ondulado,

EROSÃO – Não aparente,

DRENAGEM - Bem drenado,

USO ATUAL – Campo nativo,

CLIMA – Cfb,

DESCRITO E COLETADO POR - Joelcio Gmach; Douglas A, N, de Oliveira; Jaime Antonio Almeida,

### **DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA**

**A1** 0 – 11 cm, bruno-avermelhado escuro (5YR 3/3, úmido); bruno avermelhado escuro (5YR 3/4, seco); muito argilosa, moderada muito pequena e pequena granular; ligeiramente duro, friável à firme; transição gradual e plana,

**A2** 11 – 35 cm, bruno-avermelhado escuro (5YR 3/3, úmido); vermelho amarelado (5YR 4/6, seco); muito argilosa; fraca à moderada pequena e média blocos subangulares e moderada pequena granular, ligeiramente dura, friável à firme; transição gradual e plana,

**AB** 35 – 50 cm, bruno-avermelhado escuro (5YR 3/4 úmido); bruno avermelhado (5YR 4/4, seco); muito argilosa; fraca à moderada pequena e média blocos subangulares; ligeiramente duro, friável; transição gradual e plana,

**BA** 50 – 71 cm, bruno-avermelhado escuro (4YR 3/4, úmido); vermelho amarelado (4YR 4/6 seco); argilosa; moderada pequena e média blocos subangulares; ligeiramente duro, friável à firme; transição gradual e plana,

**Bw1** 71 – 98 cm, bruno avermelhado escuro (3,5YR 3/4, úmido); bruno avermelhado escuro (3,5YR 3/8, seco); argilosa, fraca à moderada, pequena e média blocos subangulares e forte pequena e muito pequena granular; ligeiramente duro, friável a firme; transição difusa e plana,

**Bw2** 98 – 220 cm, vermelho escuro (2,5YR 3/6, úmido); vermelho escuro (2,5YR 4/6, seco); argilosa, fraca muito pequena e pequena blocos subangulares e forte pequena e muito pequena granular; duro, friável; transição difusa e plana,

**Bw3** 220 – 350 cm + (coletada amostra com trado na profundidade de 350 cm),  
Atividade da Argila: Bw1: 7,4; Bw2: 7,5; Relação textural = 1,09.

## ANEXO C – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – NBCUR

DESCRIÇÃO GERAL: PROJETO: XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo  
INSTITUIÇÃO: EPAGRI-CIRAM (Empresa de Pesquisa e Extensão Rural de SC- Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina); IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística); UDESC-DSRN (Universidade do Estado de Santa Catarina-Departamento de Solos e Recursos Naturais); UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina).

DATA: 16/10/2012

CLASSIFICAÇÃO: NITOSSOLO BRUNO.

UNIDADE DE MAPEAMENTO: Vacaria.

LOCALIZAÇÃO: Aproximadamente 1 km a partir do trevo de Curitibanos na BR 470 sentido a Campos Novos no lado esquerdo da via.

MUNICÍPIO E ESTADO: Curitibanos - SC.

COORDENADAS: 27°18'42,2"S e 50°35'26,8"W (Datum SAD69).

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL: barranco em beira de estrada com aproximadamente 10% de declive coberto por gramíneas.

ALTITUDE: 1018 m.

LITOLOGIA: Basalto.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Serra Geral.

CRONOLOGIA: Juro-Cretáceo.

MATERIAL ORIGINÁRIO: Intemperismo/alteração do material supracitado.

PEDREGOSIDADE: Não pedregoso.

ROCHOSIDADE: Não rochoso.

RELEVO LOCAL: Suave ondulado.

RELEVO REGIONAL: Ondulado.

EROSÃO: Não aparente.

DRENAGEM: Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta subtropical perenifólia (floresta ombrófila mista) e vegetação campestre de altitude (campo subtropical).

USO ATUAL: Pastagem.

CLIMA: Cfb.

DESCRITO E COLETADO POR: Antônio Lunardi Neto; Denilson Dortzbach; Jaime Antônio Almeida; Pablo Grahl dos Santos e Sérgio Hideiti Shimizu.

## DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

**A1** - 0-15 cm; bruno-escuro (7,5YR 3/3, úmido) e bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, seco); moderada pequena granular e moderada pequena e muito pequena, blocos angulares e subangulares; dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana e gradual.

**A2** - 15-40 cm; bruno-escuro (7,5YR 3/3, úmido) e bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, seco); moderada pequena e muito pequena, blocos angulares e subangulares e moderada pequena granular; dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana e clara.

**AB** - 40-55 cm; bruno-escuro (7,5YR 3/3, úmido) e bruno (7,5YR 4/3, seco); moderada pequena e muito pequena blocos angulares e subangulares; dura, friável a firme, plástica e pegajosa; transição plana e gradual.

**BA** - 55-80 cm; bruno-avermelhado-escuro a bruno-avermelhado (5YR 3,5/4, úmido) e bruno-avermelhado (5YR 4/4, seco); forte grande prismática que se desfaz em moderada média e pequena blocos subangulares e angulares; cerosidade fraca e comum; muito dura, firme, ligeiramente plástica e pegajosa; transição plana e gradual.

**Bt1** - 80-128 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/4, úmido) e bruno-avermelhado (5YR 4/4, seco); forte grande prismática que se desfaz em moderada média e pequena blocos subangulares; cerosidade moderada e comum; muito dura a extremamente dura, firme, ligeiramente plástica e pegajosa; transição plana e difusa.

**Bt2** - 128/180 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/4, úmido) e bruno-avermelhado (5YR 4/4, seco); forte grande prismática que se desfaz em moderada média e pequena blocos subangulares; cerosidade moderada e comum; superfícies foscas comuns vermelho-amareladas; muito dura, firme, ligeiramente plástica e pegajosa; transição plana e difusa.

**Bt3** - 180-210+ cm; bruno-avermelhado-escuro a bruno-avermelhado (4YR 3,5/4, úmido); fraca a moderada grande prismática que se desfaz em fraca a moderada média e grande blocos subangulares; superfícies foscas comuns vermelho-amareladas; friável, plástica e ligeiramente pegajosa.

**RAÍZES** – Abundantes fasciculadas finas no A1 e A2; muitas fasciculadas finas no AB e BA; comuns fasciculadas finas no Bt1; poucas fasciculadas finas no Bt2 e raras fasciculadas finas no Bt3.

**OBSERVAÇÕES:** • Grãos de quartzo milimétricos e centimétricos comuns no AB, BA e Bt1, raros centimétricos nos demais horizontes inferiores;

• Pelotas centimétricas de material orgânico na parte inferior do B;

- Intensa atividade biológica de cupins até o Bt1;
- Intenso fendilhamento no B quando seco “caráter retrátil”;
- Capeamento de plasma vermelho-amarelado (5YR 4/6) no Bt3 recobrindo toda a face de alguns macroagregados principalmente nas fendas maiores, idem no Bt2, mas em menor quantidade.

## ANEXO D – BOLETIM METEOROLÓGICO DE VACARIA

Tabela – Boletim Meteorológico de Vacaria

Vacaria - 2022

<b>MÊS</b>	<b>Temperaturas Médias</b>			<b>Precip.</b>	<b>Dias com</b>	<b>U.R.</b>	<b>Vel.</b>	<b>HF &lt;</b>
	<b>T. mín</b>	<b>T. máx</b>	<b>T. méd</b>	<b>(mm)</b>	<b>Precipitação</b>	<b>(%)</b>	<b>(m/s)</b>	<b>7,2°C</b>
JAN	15,5	29,0	21,0	152,0	10	76,2	2,6	0
FEV	14,3	27,3	19,8	84,6	11	77,2	2,8	0
MAR	13,7	23,7	17,9	160,2	16	86,4	3,1	9
ABR	10,7	21,1	15,2	187,2	11	85,3	3,1	34
MAI	7,0	16,1	11,0	379,0	15	88,8	3,1	141
JUN	5,4	14,7	9,8	312,2	12	88,5	3,2	201
JUL	8,8	20,1	13,7	87,4	7	80,9	3,8	87
AGO	5,4	17,6	11,1	140,0	11	81,9	3,6	165
SET	6,3	17,8	11,6	59,8	10	81,2	3,7	98
OUT	9,7	20,7	14,7	171,8	12	81,7	3,2	24
NOV	9,4	23,2	15,7	22,2	6	72,8	3,3	50
DEZ	13,4	26,7	19,2	142,0	11	76,0	3,0	0
Total				1898,4				
Média	10,0	21,5	15,1	158,2	11	81,4	3,2	809
Máxima			34,3					
Mínima	-2,7							

Fonte: EMBRAPA (2022)