



# **CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS**

*Rede credenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016*  
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

Thaynara Lang de Oliveira

ESTABILIZAÇÃO DO SOLO DA REGIÃO DE PALMAS – TO, COM ADIÇÃO DE CAL  
HIDRATADA PARA USO NA PAVIMENTAÇÃO.

Palmas – TO

2018

Thaynara Lang de Oliveira  
ESTABILIZAÇÃO DO SOLO DA REGIÃO DE PALMAS – TO, COM ADIÇÃO DE CAL  
HIDRATADA PARA USO NA PAVIMENTAÇÃO.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II elaborado e apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientadora: Prof: Ms. Jacqueline Henrique

Thaynara Lang de Oliveira

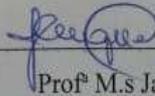
ESTABILIZAÇÃO DO SOLO DA REGIÃO DE PALMAS – TO, COM ADIÇÃO DE CAL  
HIDRATADA PARA USO NA PAVIMENTAÇÃO.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II elaborado e  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Civil pelo Centro Universitário  
Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientadora: Prof: Ms. Jacqueline Henrique

Aprovado em: 06 / 11 / 18

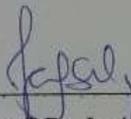
BANCA EXAMINADORA



Prof<sup>ª</sup> M.s Jacqueline Henrique

Orientador

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP



Prof<sup>º</sup> Dr. José Geraldo Delvaux Silva

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP



Prof<sup>ª</sup> Dra. Michele Ribeiro Ramos

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Palmas – TO

2018

## **AGRADECIMENTO**

- A Deus, por me dar saúde e força para conseguir cumprir minhas metas pessoais e obrigações durante a graduação de Engenharia Civil.
- A minha orientadora prof. Dr. Jacqueline Henrique pelo suporte e conhecimento adquirido durante a construção desse trabalho. Aos demais membros da banca, agradeço pelos ensinamentos, sugestões e correções.
- Aos meus amigos e companheiros Idebrano Cardoso, Miller Pereira, Ariella Passarin e Gyullia Gabriela por estar presente na execução do trabalho e ajudar com os conhecimentos sobre os ensaios realizados.
- A toda minha família, por sempre apoiar minhas decisões, incentivar. Quero agradecer em especial meu pai e minha mãe, meus maiores incentivadores, essa graduação é por eles. Obrigada por nunca desistir de mim, por sempre priorizar minha educação e sonhar meus sonhos comigo.
- A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

OLIVEIRA, T. L. **ESTABILIZAÇÃO DO SOLO DA REGIÃO DE PALMAS – TO, COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA PARA USO NA PAVIMENTAÇÃO**. 2018, 66 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil). Centro Universitário Luterano, Palmas, TO.

Na construção de um pavimento muitas vezes o que onera o custo do projeto é o transporte do material de outra região quando o material local não atende os requisitos do projeto. A utilização da cal hidratada como estabilizante químico tem se mostrado eficiente no melhoramento das características de solos. Porém algumas variáveis podem interferir no processo de estabilização, sendo necessário realizar um estudo das propriedades físicas e mecânicas do solo, além de analisar a melhor dosagem de cal e tempo de cura. Diante dessa necessidade, buscou-se nesse trabalho analisar o comportamento do solo natural coletado aos efeitos das dosagens 4, 6 e 8% de cal hidratada sob os tempos de cura 7 e 14 dias no aumento da resistência do solo verificada através dos ensaios de CBR e Resistência à compressão simples. Os resultados obtidos mostram que os teores de cal avaliados reduzem a plasticidade e expansão do solo argiloso, aumentaram a capacidade de suporte do solo, observando uma relação crescente do CBR com o aumento da dosagem de cal. A dosagem de 4% foi suficiente para enquadrar o solo nos padrões do DNIT para a utilização em camadas de Sub-base, obtendo um ganho de capacidade de suporte de 38% com relação ao solo natural atingindo um CBR de 21,5%. Na resistência à compressão simples do solo também houve aumento considerável da tensão de ruptura, atingindo 1,9 Mpa na dosagem de 8 % de cal em 14 dias de cura. Entretanto ao comparar os resultados obtidos nos tempos de 7 e 14 dias de cura, percebeu-se que a variável tempo não apresentou diferenças significativas para o processo nas condições testadas.

**Palavras chave:** Estabilização química, Solo-cal, CBR, Expansão.

**OLIVEIRA, T. L. ESTABILIZAÇÃO DO SOLO DA REGIÃO DE PALMAS – TO, COM ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA PARA USO NA PAVIMENTAÇÃO.** 2018, 66 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil). Centro Universitário Luterano, Palmas, TO.

### **ABSTRACT**

In the construction of a pavement many times what it costs the project is the transport of the material of another region when the local material does not meet the requirements of the project. The use of hydrated lime as a chemical stabilizer has been shown to be efficient in improving soil characteristics. However, some variables may interfere in the stabilization process, being necessary to study the physical and mechanical properties of the soil, as well as to analyze the best lime dosage and cure time. In view of this need, we sought to analyze the behavior of the natural soil collected to the effects of the dosages of 4, 6 and 8% of hydrated lime under the cure times 7 and 14 days in the increase of soil resistance verified by the CBR tests and Simple compression strength. The results show that the lime content evaluated reduced clay plasticity and soil expansion, increased soil support capacity, and observed an increasing ratio of CBR to increased lime dosage. The 4% dosage was enough to frame the soil in the DNIT standards for use in sub-base layers, obtaining a support capacity gain of 38% relative to the natural soil reaching a CBR of 21.5%. In the resistance to simple compression of the soil there was also a considerable increase of the rupture tension, reaching 1.9 Mpa in the dosage of 8% of lime in 14 days of cure. However, when comparing the results obtained at 7 and 14 days of cure, it was observed that the time variable did not present significant differences for the process under the conditions tested.

**Keywords:** Chemical stabilization, Soil-lime, CBR, Expansion.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1:</b> Esquema de seção transversal do pavimento.....	18
<b>Figura 2:</b> Curva de compactação de diferentes solos. ....	21
<b>Figura 3:</b> Mecanismo de troca de cátions. ....	24
<b>Figura 4:</b> Localização da jazida.....	26
<b>Figura 5:</b> Ensaio de Caracterização Física.....	27
<b>Figura 6:</b> Dosagens de cal hidratada adicionas ao solo.....	28
<b>Figura 7:</b> Ensaio de compactação da mistura solo-cal.....	29
<b>Figura 8:</b> Ensaio de determinação do índice de suporte Califórnia.....	30
<b>Figura 9:</b> Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	31
<b>Figura 10:</b> Curva granulométrica do solo natural.....	32
<b>Figura 11:</b> Curva de penetração do solo natural.....	33
<b>Figura 12:</b> Limites de consistência da mistura solo-cal. ....	34
<b>Figura 13:</b> CBR das misturas solo cal. ....	36
<b>Figura 14:</b> Resistência à compressão Simples das misturas solo cal com 7 dias de cura. ....	38
<b>Figura 15:</b> Resistência à Compressão Simples aos 7 e 14 dias de cura.....	39

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1-</b> Terminologia do Sistema Unificado.....	15
<b>Tabela 2:</b> Classificação HighWay ResearchBoard (HRB). .....	16
<b>Tabela 3:</b> Granulometria para base granular.....	19
<b>Tabela 4:</b> Caracterização física do solo natural. ....	32
<b>Tabela 5:</b> Resumo da caracterização mecânica do solo natural. ....	33
<b>Tabela 6:</b> Análise granulométrica da mistura solo-cal. ....	34
<b>Tabela 7:</b> Compactação das misturas solo-cal.....	35
<b>Tabela 8:</b> Expansão das misturas Solo cal.....	37
<b>Tabela 9:</b> Resistência à compressão simples das misturas solo cal com 7 dias de cura. ....	38
<b>Tabela 10:</b> Resistência à compressão simples das misturas solo cal com 14 dias de cura. ....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBR	California Bearing Ratio
CEULP	Centro Universitário Luterano de Palmas
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
HRB	HighWay ResearchBoard
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
ULBRA	Universidade Luterana do Brasil
pH	Potencial hidrogeniônico
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRB	Transportation Research Board

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{CaCO}_3$	Carbonato de Cálcio
$\text{CaO}$	Óxido de Cálcio
$\text{Ca(OH)}_2$	Cal Hidratada
$\text{CO}_2$	Dióxido de Carbono
$\text{MgO}$	Óxido de Magnésio
mL	Mililitros
g	Gramas
$\text{H}_2\text{O}$	Água
W%	Umidade ótima
$\gamma_d$	Peso Específico do solo seco

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA .....	12
1.2 HIPÓTESES .....	12
1.3 OBJETIVOS .....	12
<b>1.3.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>12</b>
<b>1.3.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>12</b>
1.4 JUSTIFICATIVA .....	13
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
2.1 O SOLO .....	14
<b>2.1.1 Classificação do solo .....</b>	<b>14</b>
2.2 PAVIMENTO RODOVIÁRIO .....	17
<b>2.2.1 Constituintes do pavimento .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.2 Qualidade dos Materiais .....</b>	<b>18</b>
2.3 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO .....	19
<b>2.3.1 Compactação .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.2 Estabilização granulométrica .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.3 Estabilização química .....</b>	<b>22</b>
2.3.3.1 A cal .....	22
2.3.3.2 Estabilização solo-cal .....	23
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>26</b>
3.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS .....	26
3.2 COLETA DO SOLO .....	27
3.3 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO .....	27
3.4 DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS DE CAL HIDRATADA .....	28
3.5 ENSAIO COM A MISTURA SOLO-CAL .....	28
<b>3.5.1 Ensaio de Compactação .....</b>	<b>28</b>
<b>3.5.2 Ensaio de Determinação do Teor de Umidade .....</b>	<b>29</b>
<b>3.5.3. Capacidade de Suporte e expansão .....</b>	<b>29</b>
<b>3.5.4. Ensaio de Resistência à Compressão Simples .....</b>	<b>30</b>
3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	31
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>32</b>
4.1 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO NATURAL .....	32
<b>4.1.1 Caracterização Física .....</b>	<b>32</b>

<b>4.1.2 Caracterização Mecânica.....</b>	<b>33</b>
<b>4.2 ENSAIOS COM A MISTURA SOLO CAL.....</b>	<b>34</b>
<b>4.2.1 Análise granulométrica .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2.3 Compactação da mistura solo cal.....</b>	<b>35</b>
<b>4.2.2 Capacidade de Suporte e expansão.....</b>	<b>36</b>
<b>4.2.3 Resistência à compressão simples .....</b>	<b>37</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>41</b>
<b>7 APÊNDICES .....</b>	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o modal rodoviário é a principal alternativa para movimentação de cargas e pessoas, contribuindo significativamente para o desenvolvimento socioeconômico nacional. Este modal é responsável por 61% do deslocamento de cargas e 95% do transporte de passageiros. Embora sejam muito utilizadas às rodovias brasileiras que possuem pavimentação correspondem apenas a 12,3% da malha rodoviária nacional (CNT, 2017).

A razão para essa situação está no histórico brasileiro de baixos investimentos em infraestrutura de transportes e nos altos custos envolvidos nos projetos de pavimentação rodoviária. Muitas vezes o que onera o custo dessas obras é o transporte de material de outra região, uma vez que o material local não apresenta as propriedades adequadas para suportar as cargas impostas ao pavimento.

A fim de reduzir os custos em obras de pavimentação e preservar os recursos naturais, a estabilização de solos surge como uma boa alternativa ao emprego de britas, tradicionalmente usadas em camadas de pavimentos e transporte de outros materiais. O processo de estabilização de solos permite melhorar as propriedades do solo local promovendo um desempenho estrutural tão satisfatório quanto aos sistemas convencionais adotados.

Existem obras que apenas a compactação ou estabilização granulométrica não é suficiente para atender especificações técnicas. Sendo necessário o emprego aditivo químico como cal, betume e cimento ao solo que reagem com os minerais presentes, melhorando as propriedades mecânicas do solo local, promovendo aumento da resistência, redução da expansão e da plasticidade e resistência à erosão.

A estabilização solo - cal aparece como uma solução de baixo custo para implantação ou recuperação de pavimentos, onde o melhoramento das propriedades mecânicas é produzido pelas reações entre a cal e os minerais argilosos, aumentando a proporção da quantidade de sílica disponível e o teor de umidade ótima (CRISTELO, 2001).

Devido à grande variabilidade de solos, nenhum método se aplica genericamente em todos os solos, sendo necessário realizar um estudo das características e propriedades mecânicas do solo, além de analisar a melhor dosagem de cal, tempo de cura e outras variáveis que podem comprometer o sucesso da estabilização.

Dessa forma, o trabalho pretende investigar a influência de diferentes dosagens de cal no processo de estabilização química de solos de Palmas - TO. Avaliando o melhoramento das características mecânica do solo, as vantagens ambientais e a viabilidade econômica da utilização da cal em estabilização de solos para pavimentos rodoviários.

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O sucesso da estabilização química como solo-cal depende de vários fatores, sendo necessário realizar ensaios com o solo antes e após a adição de cal. Diante de tal circunstância, quais são as condições e dosagem de cal em que ocorre de melhor forma estabilização química do solo de Palmas- TO, capaz de produzir o maior aumento da resistência do solo?

## 1.2 HIPÓTESES

Levando em consideração outros estudos realizados de estabilização solo-cal, em regiões de solo com características semelhantes ao do solo estudado, espera-se que as dosagens necessárias para estabilizar o solo estejam no intervalo de 3 a 7% de cal, por se tratar de um solo com teor de argila considerável. Com relação ao tempo de cura, espera-se tenha diferença entre as resistências a compressão dos corpos de prova rompidos a 7 e 14 dias.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento de um solo da região de Palmas-TO, que poderá ser utilizado como sub-base para pavimento urbano, após a sua estabilização química com adição de cal hidratada.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Verificar as propriedades físicas e mecânicas do solo natural coletado de uma jazida em Palmas-TO utilizados na pavimentação;
- Avaliar os efeitos de dosagens recomendadas de cal hidratada nas propriedades físicas do solo;
- Avaliar os efeitos de dosagens de cal hidratada na capacidade suporte e expansão do solo;
- Avaliar a influência das dosagens de cal hidratada na resistência à compressão simples do solo, empregando-se os tempos de cura de 7 e 14 dias.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

O estado do Tocantins assim como tantos outros estados brasileiros possui uma forte carência de estradas e vias urbanas pavimentadas. Muitas vias existentes não estão em boas condições, apresentando degradação precoce, o que pode ser justificado por problemas de execução e excesso de carga.

Na execução de um projeto de pavimentação é importante o conhecimento das características e propriedades mecânicas do solo disponível no local da obra, uma vez que o mesmo será responsável por suportar as cargas impostas sobre o pavimento. Contudo ocorre com certa frequência a existência de solos que não apresentam as propriedades adequadas para atender aos requisitos técnicos do projeto.

Nestes casos, normalmente a solução mais comum adotada é a procura por outros materiais naturais, que preencham os requisitos técnicos mínimos, porém ocasiona custos adicionais, como por exemplo, de transporte, que muitas vezes podem inviabilizar o projeto (LOPES, 2011).

Sendo assim, surge a necessidade de buscar novos materiais que sejam viáveis técnico e economicamente para executar novos pavimentos. Uma alternativa é a estabilização química que permite o melhoramento das propriedades mecânicas do solo local de custo relativamente baixo, quando comparado com transporte de solos naturais.

A estabilização química de solos com o emprego da cal é uma técnica muito antiga, que resulta em melhorias significativas na textura e estrutura do solo, minimizando a plasticidade e gerando uma elevação na resistência mecânica (CRISTELO, 2001).

Entretanto a eficácia do método de estabilização depende de diversas variáveis, tais como a constituição química e mineralógica do solo local, a granulometria e rugosidade das partículas e o tipo de cal empregada e suas dosagens. Para alguns tipos de solos esta estabilização pode não ser eficiente, não havendo aumento da capacidade de suporte, que é o principal objetivo do uso deste material para construção rodoviária.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 O SOLO**

O solo é o material da crosta terrestre proveniente da decomposição de rochas, constituído por elementos minerais e/ou orgânicos, que dependem da composição química e mineralógica da rocha de origem, das características do relevo, dos diferentes climas e do tempo de exposição às intempéries (NEVES et al., 2009).

Segundo Santos (2012) o solo pode receber diversas definições de acordo com a área do estudo, seja ela geológica, pedológica, agrícola, geotécnica. Na Engenharia Civil, por exemplo, solo define-se como material escavável, que perde sua resistência quando entra contato com a água.

Por ser um dos materiais mais antigos empregados na construção civil, faz-se presente na maioria das obras de engenharia, sendo utilizado como base de suporte para estruturas de fundações, por isso então faz-se necessário o conhecimento de suas propriedades, para que possa ser feita uma previsão de seu comportamento diante das solicitações (SARTORI, 2015).

#### **2.1.1 Classificação do solo**

A primeira característica que distingue os solos é a granulometria, ou seja o tamanho das partículas que o constituem. Alguns solos possuem partículas visíveis a olho nu, como os grãos de pedregulho, já outros solos apresentam partículas tão finas que não podem ser percebidas individualmente (PINTO, 2006).

Didaticamente o solo pode ser classificado quanto à sua origem, em solos residuais que são formados através da degradação da rocha e solos transportados os quais são provenientes do transporte de materiais. Em solos transportados é comum encontrar solos finos, que são mais susceptíveis à estabilização com cal (AZEVEDO, 2010).

Já o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) fundamenta-se na identificação dos solos conforme as suas propriedades de textura e plasticidade, e reúne-os de acordo com o seu comportamento. Esse sistema leva em conta a porcentagem de pedregulhos, areias e finos; a forma da curva granulométrica; a plasticidade e a compressibilidade (SOUSA, 2013).

Neste sistema, todos os solos são identificados pelo conjunto de duas letras. Onde as cinco primeiras letras indicam o tipo principal do solo e as quatro restantes correspondem a dados complementares dos solos, conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1-** Terminologia do Sistema Unificado

<b>G</b>	<b>Pedregulho</b>
<b>S</b>	Areia
<b>M</b>	Silte
<b>C</b>	Argila
<b>O</b>	Solo Orgânico
<b>W</b>	Bem Graduado
<b>P</b>	Mal Graduado
<b>H</b>	Alta Compressibilidade
<b>L</b>	Baixa Compressibilidade
<b>Pt</b>	Turfas

**Fonte:** PINTO (2006).

Segundo Das (2007) o Sistema Unificado de Classificação dos Solos agrupa o solo em duas categorias distintas (DAS, 2007):

1. Solos de granulometria grossa que possuem menos de 50% de suas partículas passando pela peneira N° 200. Os símbolos do grupo iniciam com a letra G ou S. A letra G representa um solo pedregulhoso enquanto a letra S um solo arenoso ou areia (DAS, 2007).

2. Solos de granulometria fina são compostos de 50% ou mais de materiais passantes na peneira N° 200. Os prefixos que indicam este grupo são as letras M (que representa silte inorgânico) e C (que indica argila inorgânica). Neste grupo também há a presença de siltes e argilas orgânicas que é identificado pela letra O. Para designar a turfa, que é altamente orgânico, geralmente fibrilares e muito compressíveis é empregado o símbolo Pt (DAS, 2007).

Outro sistema de classificação bastante utilizado em pavimentação, de acordo com o manual de pavimentação do DNIT (2006), é o HighWay ResearchBoard (HRB) aprovado em 1945 e que constitui um aperfeiçoamento do antigo sistema da Public Roads Administration, proposto em 1929. Nesta classificação, os solos são reunidos em grupos e subgrupos, em função de sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo. Na Tabela 2 a seguir é apresentado o quadro de classificação dos solos segundo o TRB.

**Tabela 2:** Classificação HighWay ResearchBoard (HRB).

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 / A-7-6
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Grupo	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

**Fonte:** DNIT, 2006.

A determinação do índice de grupo baseia-se nos limites de Atterberg (LL e IP) do solo e na porcentagem de material fino que passa na peneira número 200 (0,075mm). Seu valor é obtido utilizando a seguinte expressão:

$$IG = 0,2 \cdot a + 0,005 \cdot a \cdot c + 0,01 \cdot b \cdot d$$

Em que:

a = porcentagem do solo que passa na peneira nº 200 menos 35%. Se o valor de “a” for negativo adota-se zero, e se for superior 40, adota-se este valor como limite máximo.  $a = P_{p,200} - 35\%$  (0 - 40).

b = porcentagem do solo que passa na peneira nº 200 menos 15%. Se o valor de “b” for negativo adota-se zero, e se for superior 40, adota-se este valor como limite máximo.  $b = P_{p,200} - 15\%$  (0 - 40)

c = valor do limite de liquidez menos 40%. Se o valor de “c” for negativo adota-se zero, e se for superior a 20, adota-se este valor como limite máximo.  $c = LL - 40\%$  (0 - 20)

d = valor do índice de plasticidade menos 10%. Se o valor de “d” for negativo adota-se zero, e se for superior a 20, adota-se este valor como limite máximo.  $d = IP - 10\%$  (0 - 20)

Após a classificação do solo é preciso verificar quanto à utilização para a pavimentação, quanto ao nível de tráfego da via em um horizonte de tempo determinado que definirá quais as resistências e espessuras das camadas necessárias ao dimensionamento da via (DNIT, 2006).

Segundo Senço (1997), o Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR), é uma das características mais acolhidas para aferir o desempenho de um solo, seja ele como fundação de pavimento ou como membro das camadas desse pavimento. O ensaio consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo-de-prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) define os valores prováveis de CBR para o grupo de classificação HRB e SUCS. Além de indicar os limites que devem ser atendidos pelos materiais utilizados em cada camada do pavimento, seja ela base, sub-base e sub leito.

## 2.2 PAVIMENTO RODOVIÁRIO

Construído sobre a superfície de terraplenagem, o pavimento é dimensionado para resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e de ações do clima, e oferecer aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com comodidade, economia e segurança (BERNUCCI et al, 2006).

Segundo dados do CNT (2017), no Brasil o modal rodoviário é o mais utilizado tanto para escoamento de produtos agrícolas e industrializados como também para o deslocamento de pessoas. Sendo responsável por 61% do transporte de cargas e 95% do transporte de passageiros. Porém apenas 12,9% do total das rodovias brasileiras são pavimentadas, o que mostra que a grande maioria das rodovias não possui pavimentação.

Diante de sua grande importância para o desenvolvimento socioeconômico do país tornou-se necessário realizar pesquisas que viabilizam a execução de novos pavimentos, com materiais alternativos de bom desempenho. O estudo na área de estabilização do solo para o uso em pavimentação tem contribuído muito para essa perspectiva (SANTOS, 2008).

### 2.2.1 Constituintes do pavimento

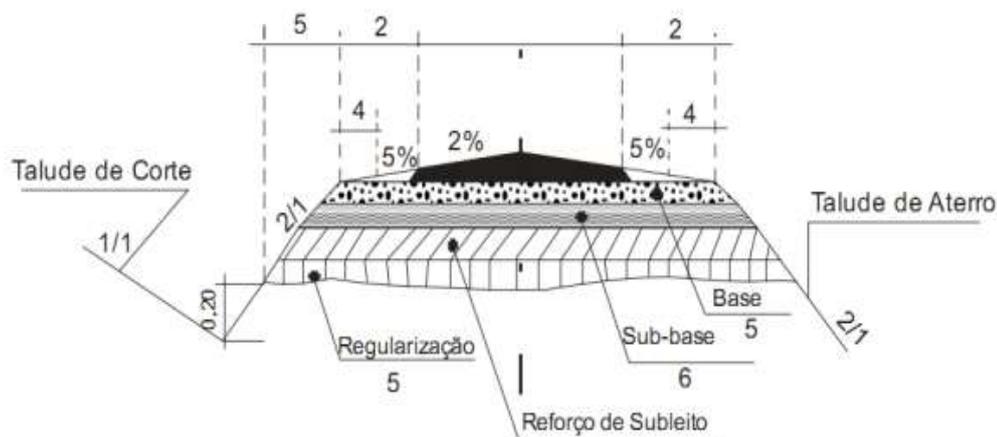
Como o pavimento é uma estrutura constituída por diversas camadas, existem serias dificuldades para achar um termo que possa definir toda a estrutura. Essencialmente pode-se classificar a estrutura de um pavimento em: rígidos, semi-rígidos e flexíveis. Alguns autores classifica-os em apenas dois grupos, retirando o grupo de pavimento semi-rígidos aos demais.

Segundo Souza (1980), o pavimento rígido é constituído por uma placa de concreto de cimento, camada que tem a função de base e revestimento. No pavimento rígido o dimensionamento é norteado pela resistência do próprio pavimento.

De acordo com o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2006), a seção transversal de um pavimento é constituída por:

- Subleito: terreno de fundação do pavimento;
- Leito: superfície obtida por terraplenagem ou obra-de-arte;
- Greide do Leito: perfil do eixo longitudinal do leito;
- Regularização: camada destinada a conformar o leito, transversal e longitudinalmente de modo a atender as especificações;
- Reforço do Subleito: camada de espessura constante, utilizada por fatores técnico-econômicos, acima da regularização e abaixo do subleito; seu material possui características geotécnicas melhores que o do subleito e piores que o da sua camada superior;
- Sub-base: por razões técnico-econômicas, é a camada construída quando for desaconselhável construir a base diretamente sobre a regularização;
- Base: camada anterior ao revestimento que tem a função de resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego;
- Revestimento: camada destinada a receber diretamente o rolamento dos veículos, melhorando-o, quanto à comodidade e segurança, resistindo ao desgaste; deve ser o quanto possível impermeável.

**Figura 1:** Esquema de seção transversal do pavimento.



**Fonte:** DNIT (2006).

### 2.2.2 Qualidade dos Materiais

O manual de pavimentação do DNIT (2006) estabelece os limites de CBR, expansão, limites de liquidez e índice de plasticidade, que os materiais das camadas do pavimento devem se enquadrar para serem utilizados:

- Materiais para subleito devem apresentar uma expansão, medida no ensaio CBR,  $\leq 2\%$  e um CBR  $\geq 2\%$ .

- Materiais pra reforço do subleito, que apresentam CBR maior que o do subleito e expansão  $\leq 1\%$  (medida com sobrecarga de 10 lb).
- Materiais para sub-base, os que apresentam: CBR  $\geq 20\%$ , IG = 0 e expansão  $\leq 1\%$  (medida com sobrecarga de 10lb).
- Materiais para base, os que apresentam: CBR  $\geq 80\%$  e expansão  $\leq 0,5\%$  (medida com sobrecarga de 10lb), Limite de liquidez  $\leq 25\%$  e índice de plasticidade  $\leq 6\%$ .

Ainda segundo o DNIT (2006) os materiais para base granular devem ser enquadrar numa das seguintes faixas granulométricas, apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3:** Granulometria para base granular.

Tipos Peneiras	Para $N > 5 \times 10^6$			Para $N < 5 \times 10^6$			Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	$\pm 7$
1"	-	75-90	100	100	100	100	$\pm 7$
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	$\pm 7$
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	$\pm 5$
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	$\pm 5$
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	$\pm 2$
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	$\pm 2$

**Fonte:** DNIT (2006).

### 2.3 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

Em obras rodoviárias sempre se tem a pretensão de que a estrutura do pavimento seja construída sobre solos estáveis, porém são frequentes as situações onde o solo natural não possui os requisitos necessários para a execução do projeto. Nesses casos, segundo Ingles & Metcalf (1972) uma decisão dentre as três seguintes precisa ser tomada:

- Aceitar o material local e redimensionar o projeto de acordo com as restrições estabelecidas pelo material;
- Remover o material local e substituí-lo por material de características superiores, o que implicaria custos com transporte;
- Alterar as propriedades do solo local existente de modo a criar um novo material capaz de satisfazer as exigências da tarefa em questão.

A escolha da solução a ser adotada, é um aspecto determinante na qualidade e custo final da obra. Além disso, fatores como volume de corte e aterro, tipo de solo disponível no local, e distância de transporte das jazidas, caixas de empréstimos e bota-foras, também devem ser considerados, uma vez que influenciam diretamente nos custos da obra (BATISTA, 1976).

Segundo Makusa (2012) estabilizar um solo visa melhorar sua resistência às cargas, ao desgaste ou à erosão, e aumentá-la quando o solo é submetido a ação da água, através da compactação, correção de sua granulometria e plasticidade ou pela adição de substâncias que lhe atribuem coesão. O autor ainda menciona que os mais simples processos de estabilização são a compactação e a drenagem.

As principais técnicas de estabilização de solo segundo Medina e Motta (2004) são:

- Estabilização mecânica: assegura estabilidade ao solo sem mistura de aditivos. Assim, as propriedades do solo podem ser melhoradas por compactação e/ou drenagem, lembrando que esta técnica é utilizada em conjunto com outras técnicas, pois quase sempre a compactação do solo se faz necessária;
- Estabilização granulométrica: onde a estabilização é feita pela mistura de solos de tipos diferentes a fim de corrigir falhas na granulometria do solo;
- Estabilização química: na qual a estabilização é obtida por reações químicas como as cimentantes pozolânicas, aglomeração e carbonatação.

Devido à grande variabilidade de solos, nenhum método se aplica genericamente em todos os solos, cada um sendo mais adequado para um certo tipo de solo. Contudo, a estabilização não só deveria ser pensada em termos de tratamento corretivo, mas também como uma medida preventiva ou de segurança contra condições adversas que se desenvolvem no curso da construção ou ao longo da vida da estrutura (INGLES e METCALF,1972).

### **2.3.1 Compactação**

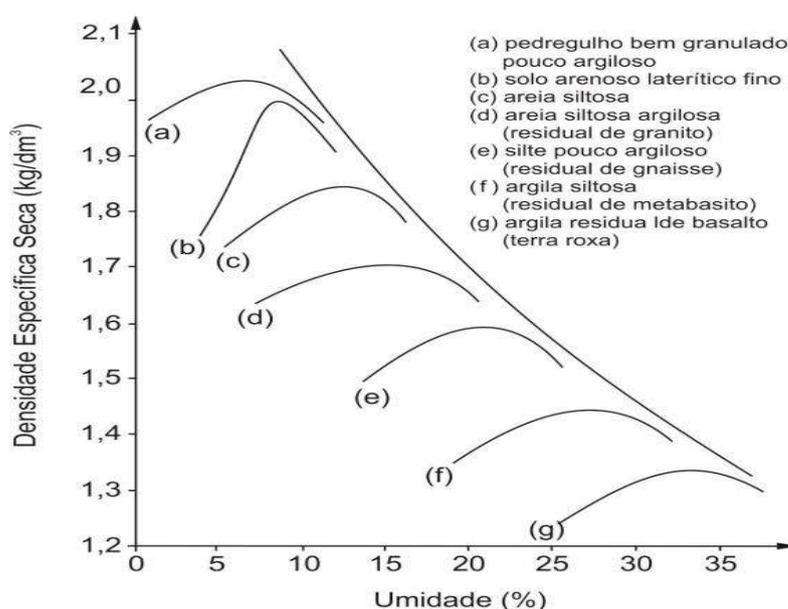
Segundo Pinto (2006), a compactação busca aumentar o contato entre os grãos e a homogeneidade do solo, uma vez que a redução do seu índice de vazios melhora diversas das suas propriedades. Sendo empregada em todas obras de pavimentação, o processo específico de compactação a ser utilizado depende não só do tipo de obra, mas também do tipo de solo, e requer a definição da densidade a ser alcançada e da umidade em que solo deve estar no momento da compactação. Tal situação ocorre porque a densidade é função da energia de compactação (obtida com certo número de passadas de um determinado equipamento ou golpes de um soquete) e da umidade do solo.

A influência da umidade ocorre da seguinte forma: quando a compactação ocorre a uma umidade baixa, o atrito entre as partículas dificulta a redução dos vazios; com umidades mais elevadas, as partículas deslizam entre si e acomodam-se de forma mais compacta, graças à lubrificação provida pela água; caso a umidade seja muito alta, a água impede a saída de ar

dos vazios e, dessa forma, o índice de vazios não reduz. Já o aumento da energia de compactação permite, a um mesmo solo, alcançar maiores densidades, mas o acréscimo de energia desloca a faixa de umidade ideal, em que a água auxilia o processo de compactação, para uma situação cada vez mais seca (MEDINA E MOTTA, 2004).

Pinto (2006) informa valores comuns de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima para alguns tipos de solos compactados na energia Proctor Normal: umidade ótima de 25 a 30% e massa específica aparente seca máxima de 1,5 a 1,4 g/cm<sup>3</sup> para solos argilosos; umidade ótima de 12 a 14% e massa específica aparente seca máxima de 1,9 g/cm<sup>3</sup> para areias finas argilosas lateríticas; umidade ótima de 9 a 10% e massa específica aparente seca máxima de 2,0 a 2,1 g/cm<sup>3</sup> para areias com pedregulhos, bem graduadas e pouco argilosas.

**Figura 2:** Curva de compactação de diferentes solos.



**Fonte:** Pinto, 2006.

### 2.3.2 Estabilização granulométrica

Segundo Santanna (1998), pode-se entender por estabilização granulométrica a técnica que consiste na mistura e compactação de solos naturais, as misturas podem ser, misturas artificiais de solos, materiais de solos (areia, pedregulho) e materiais de pedra (pedra britada, pó de pedra) fornecendo uma granulometria contínua ao solo, a qual será responsável por um produto final com características mecânicas superiores às do solo original.

Segundo o mesmo autor existe uma forte relação entre granulometria e estabilidade, pois a estabilidade é maior para solos com uma distribuição granulométrica que lhe confirmam alta

densidade, onde as frações menores do solo preenchem os vazios entre as frações maiores, mas sem evitar seu contato permitindo que haja atrito entre elas (SANTANNA, 1998).

### 2.3.3 Estabilização química

A estabilização química consiste na adição de um ou mais produtos químicos (agente estabilizador) que, ao solidificarem ou reagirem com as partículas de solo, transformam suas propriedades, tornando o solo estável às variações hídricas, capaz de permitir o tráfego de obra e suportar a construção das camadas superiores (SOUZA, 2013).

Nesse tipo de estabilização podem ser utilizados vários tipos de aditivos químicos. Em obras de pavimentação rodoviária a estabilização química utilizada recorre normalmente ao cimento, à cal, aos materiais betuminosos, às resinas e aos carbonatos (CRISTELO, 2011).

#### 2.3.3.1 A cal

A cal é um dos materiais mais empregados na construção civil, em aplicações que vão desde seu emprego na argamassa de assentamento de alvenaria até seu uso na estabilização de solos. É um aglomerante inorgânico resultante da calcinação de rochas carbonáticas constituídas predominantemente por carbonato de cálcio e/ ou carbonato de cálcio e magnésio, cujo endurecimento ocorre por reação com o CO<sub>2</sub> (CINCOTTO et al 2010).

Segundo Guimarães (2002), o resultado da calcinação dos carbonatos de cálcio e de cálcio-magnésio é, respectivamente, o óxido de cálcio (CaO) e cálcio -magnésio (CaO - MgO), denominadas genericamente de cal virgem ou cal viva.

A cal hidratada, obtida pela hidratação da cal viva, é encontrada na forma de pó seco. As reações de formação da cal virgem e da cal hidratada, respectivamente, são representadas pelas Equações 1.1 e 1.2



A cal hidráulica é produzida a partir da cozedura de calcários com porcentagens de argilas normalmente compreendidas entre 5% e 20% a uma temperatura entre 1200 °C e 1500 °C (SILVA, 2010). A cal hidráulica é um produto que enrijece tanto em contato com a água quanto com o ar (COUTINHO, 2006).

Segundo Corrêa (2008), a cal pode ser usada para tratar solos em diferentes níveis, dependendo do objetivo. O tratamento de menor grau é usado para secar e modificar temporariamente os solos. Tal tratamento produz uma plataforma de trabalho para construção

ou estradas temporárias. Um maior grau de tratamento, baseado em testes, projetos, e técnicas de construção adequadas produz uma estabilização estrutural permanente dos solos.

O manual de pavimentação do DNIT (2006), os teores de 4 a 8% de cal são utilizados com mais frequência em estudos de estabilização química e apresentam bons resultados quanto ao ganho de resistência.

### 2.3.3.2 Estabilização solo-cal

A estabilização de solos com cal tem-se revelado um método eficaz, ecológico e económico, na medida em que permite o aproveitamento dos solos existentes no local onde a obra será implementada, ao invés de substituí-los por outros, evitando despesas adicionais e impactos ambientais (SILVA, 2010).

Ingles e Metcalf (1972) afirmam que a estabilização com cal se desenvolveu nos estados do sul dos Estados Unidos da América nos anos 30. Por volta dos anos 50 o uso do tratamento com cal para argilas puras foi difundido no Texas, e o caso remanesce ainda hoje (CORRÊA, et al., 2009).

No Brasil há muitos estudos sobre solo-cal, possuindo algumas obras experimentais com o emprego da mistura solo-cal, datadas entre os anos de 1970 e 2000, das quais podem ser citadas a duplicação da rodovia BR-040, trecho Belo Horizonte – Sete Lagoas e a adição de cal ao subleito da rodovia BR-381 entre Nepomuceno/MG e Três Corações/MG (AZEVEDO, 2010).

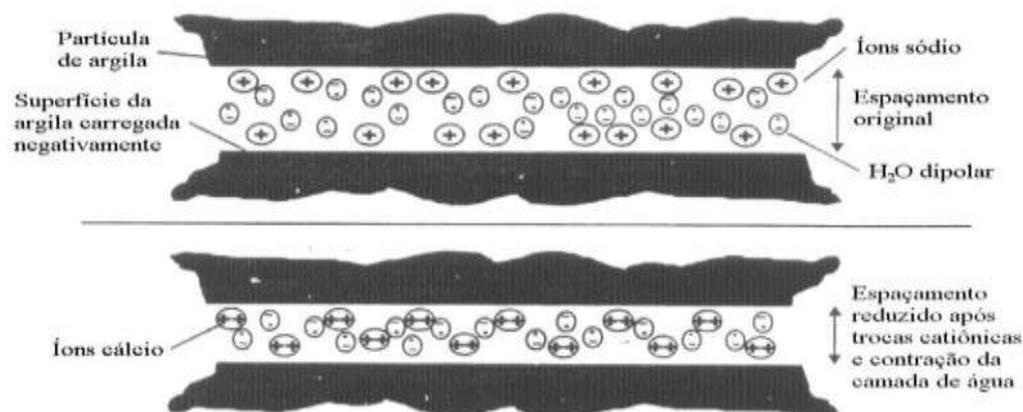
O solo-cal é um produto de estabilização química que visa a melhoria permanente das características do solo e aumentando sua resistência à ação da água e seu poder de suporte. É aplicada preferencialmente a solos argilosos e siltes caulínicos, pois a cal reage com partículas de argila e as transforma em uma forte matriz cimentícia permanentemente (GOULARTE E SILVA, 2009).

Diversas são as reações que se processam quando se mistura a cal ao solo úmido e essas reações geralmente se processam simultaneamente, tornando difícil sua separação e análise. As principais reações que puderam ser identificadas são: troca de íons, floculação e aglomeração, carbonatação e reação pozolânica ou cimentante (AZEVEDO, 2010).

Segundo Corrêa (2008) a estabilização química com cal caracteriza-se por duas fases, a fase inicial rápida e a fase lenta:

Durante a fase rápida ocorrem reações de troca catiônica – cujo mecanismo pode ser visto na Figura 3 – e pela floculação aglomeração das partículas.

**Figura 3:** Mecanismo de troca de cátions.



**Fonte:** Adaptado de Prusinski & Bhattacharja (1999).

Sendo que essas reações, segundo Behak (2013) desenvolvem-se em poucos minutos ou horas e são chamadas de reações de melhoramento ou modificação porque causam alterações nas propriedades físicas dos solos sem ganho considerável em sua resistência.

Já fase lenta do processo de estabilização é caracterizada pelas reações pozolânicas, as quais são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica das misturas solo-cal. Esse aumento ocorre devido a reação da cal e água com as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo, formando diversos produtos cimentantes (DALLA ROSA JOHANN, 2013).

As reações não ocorrerão em solos secos e cessarão em um solo úmido que vier a secar. Segundo Goularte e Silva (2009), o efeito da cal nas propriedades do solo pode ser visto sob vários aspectos:

- Distribuição granulométrica: há uma modificação da granulometria do solo, devido à ocorrência de floculação-aglomeração e que quanto maior a quantidade de cal maior a floculação;
- Plasticidade: o limite de plasticidade (LP) cresce com o uso da cal e o limite de liquidez (LL) tende a diminuir. O aumento do teor de cal acarreta valores de IP cada vez menores. O índice de plasticidade (IP) varia com o tempo de reação;
- Compactação: a densidade diminui e o teor de umidade ótima aumenta quando se trata um solo com cal;
- Resistência: Consoli et al (1997) verificaram que o teor de cal e o tempo de cura são fatores que influenciam no aumento da resistência a compressão simples num solo estabilizado com cal.

O sucesso da estabilização do solo utilizando cal, dependentes de alguns fatores como o tipo de solo a ser estabilizado, o teor de cal empregado na mistura, o tempo e a temperatura de cura, dentre outros aspectos. Por isso para cada estabilização é necessário realizar experimentos a fim de constatar as condições ideais (BERNUCCI et al.,2006).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada no trabalho possui caráter quantitativo e qualitativo e consistiu na seleção dos materiais, coleta do solo, ensaios de caracterização, definição das dosagens de cal, ensaio do solo-cal, interpretação e análise dos resultados obtidos.

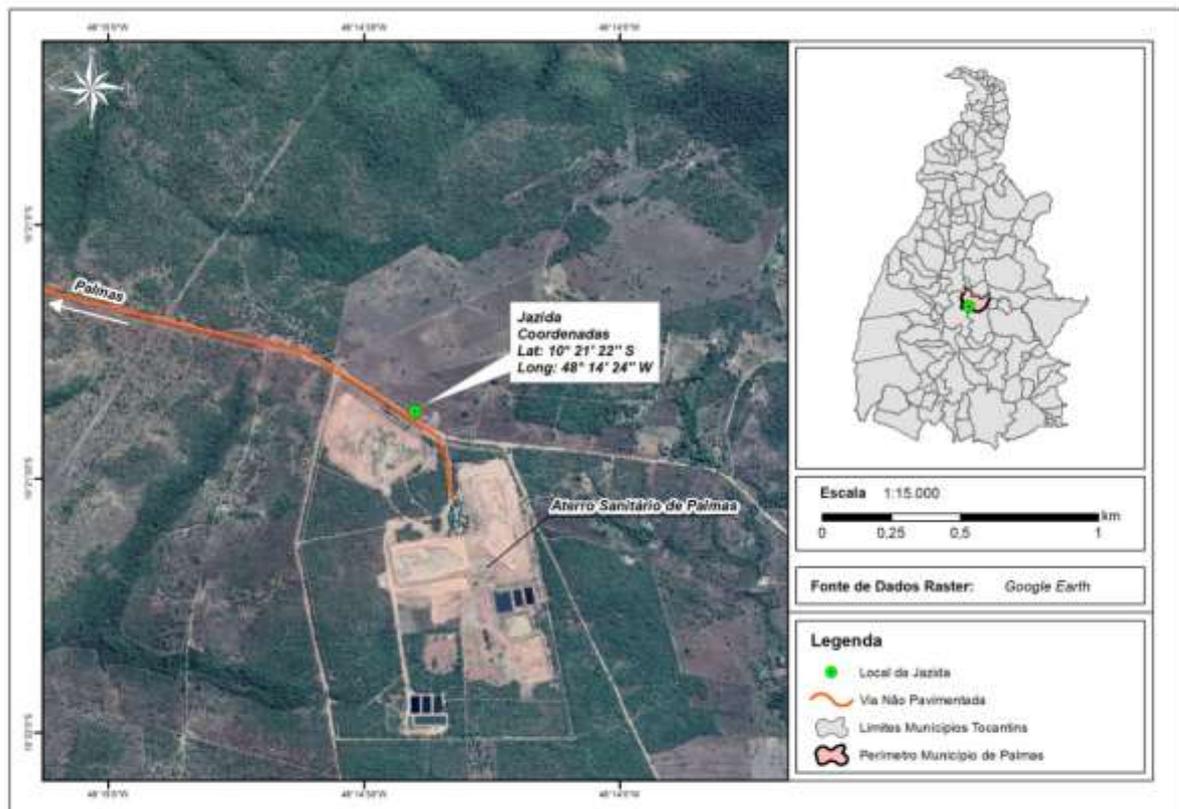
Os testes foram realizados no laboratório de Mecânica dos solos do Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA), no segundo semestre de 2018.

#### 3.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS

Buscou-se selecionar solo com teor de argila considerável para favorecer as reações entre os minerais do solo, a cal e a água. Além de possuir um potencial de resistência inferior ao necessário para atender especificações técnicas quanto ao uso na pavimentação, justificando assim a necessidade do estudo.

Desta forma escolheu-se a jazida de coordenadas geográficas latitude  $10^{\circ} 21' 22''$  S e longitude  $48^{\circ} 14' 24''$  W situada nas margens da estrada vicinal que permite o acesso ao aterro sanitário de Palmas, conforme o mapa de localização apresentado na Figura 4.

**Figura 4:** Localização da jazida



**Fonte:** Google Earth (2018)

### 3.2 COLETA DO SOLO

A amostra de solo foi coletada na quantidade necessária para realizar os ensaios, aproximadamente 150 kg. A coleta se deu a cada metro da jazida conforme a NBR 9604 Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas (ABNT, 1986).

Após a coleta a amostra foi armazenada em sacos plásticos rotulados, a fim de impedir interferências do meio e posteriormente transportados até o Laboratório de Mecânica de Solos (CEULP/ ULBRA), para a preparação das amostras e a demais ensaios.

### 3.3 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO

Foram realizados em laboratório os ensaios de caracterização física e mecânica com o solo natural e com o solo modificado com os diferentes teores de cal hidratada conforme mostra na Figura 5, utilizando as seguintes normas de especificações:

#### a) Caracterização Física

- Preparação das amostras - NBR 6457 (ABNT, 1986).
- Análise granulométrica - DNER ME 80/94
- Limite de liquidez (LL) - DNER ME 122/94
- Limite de plasticidade (LP) - DNER ME 82/94
- Massa específica (picnômetros) - NBR 6508/84 (ABNT, 1984).

#### b) Caracterização Mecânica

- Compactação (Proctor Normal) – Norma DNIT 164/2013- ME;
- ISC e Expansão – Norma DNIT 172/2016 –ME.
- Resistência a Compressão Simples – Norma DNIT 180/94- ME

**Figura 5:** Ensaios de Caracterização Física



(a) Preparação das amostras



(b) Ensaio de granulometria



(c) Ensaio de limite de liquidez



(d) Ensaio de limite de plasticidade

**Fonte:** o autor (2018).

### 3.4 DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS DE CAL HIDRATADA

Para a realização das misturas solo-cal foi utilizada a cal dolomítica hidratada (hidróxido de cálcio). As dosagens de cal foram definidas com base em literatura específica: manual de pavimentação do DINIT (2006), os teores de cal de 4 a 8% em peso relacionados ao peso total da mistura (Figura 6), são capazes de estabilizar solos argilosos.

**Figura 6:** Dosagens de cal hidratada adicionas ao solo.



**Fonte:** o autor (2018).

### 3.5 ENSAIO COM A MISTURA SOLO-CAL

#### 3.5.1 Ensaio de Compactação

Para determinação do peso específico seco máximo e a umidade ótima foram executados ensaios de compactação na energia normal, ou seja, 5 camadas e 12 golpes por camada, com

as misturas solo cal nos teores de 4, 6, e 8% de cal (Figura 7), totalizando 15 ensaios. De acordo com a seguinte norma: DNER-ME 164/2013 – Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas.

**Figura 7:** Ensaio de compactação da mistura solo-cal.



**Fonte:** o autor (2018).

### **3.5.2 Ensaio de Determinação do Teor de Umidade**

Para determinação do teor de umidade, foram executados ensaios em todas as amostras compactadas nos teores de 4, 6 e 8% com a mistura de solo, cal e água, de acordo com a seguinte norma: DNERME 213/94 – Solos – determinação do teor de umidade.

### **3.5.3. Capacidade de Suporte e expansão**

Os corpos de provas utilizados para este ensaio foram os mesmos moldados no ensaio de Proctor, mas apenas 3 corpos de prova de cada mistura são utilizados, sendo eles o de umidade ótima, o ligeiramente mais seco e o ligeiramente mais úmido.

Após o ensaio de compactação, foram colocados no tanque para imersão por 4 dias. A expansão foi medida a cada 24 horas, através do extensômetro acoplado nas amostras (Figura 8 b).

Terminado o período de embebição, os corpos de prova foram retirados da imersão e deixados escoar a água durante 15 minutos. Em seguida, o corpo de prova foi submetido à penetração do pistão (Figura 8 a), para a anotação das leituras em tempos distintos. Conforme a norma DNIT 172/2016 – Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas, sendo:

- a) Solo puro: 3 CPs;
- b) Solo a 4% de cal: 3 CPs;

- c) Solo a 6 % de cal: 3 CPs;
- d) Solo a 8% de cal: 3 CPs.

**Figura 8:** Ensaio de determinação do índice de suporte Califórnia.



(a) Determinação do CBR.



(b) Ensaio de Expansão e imersão dos CPs.

**Fonte:** o autor (2018).

### 3.5.4. Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Para determinação da tensão de ruptura do solo os corpos de prova foram moldados com a mesma energia de compactação (normal), segundo a norma DNER-ME 180/94. Estabeleceu-se dois tempos de cura: 7 e 14 dias, em câmara úmida e ao final da cura os corpos de prova foram rompidos na prensa modelo EMIC DL 30000 (Figura 9). Sendo 3 corpos de prova para cada dosagem de cal hidratada e tempo de cura , totalizando 18 ensaios com o solo-cal:

- a) Solo puro: 3 CPs ;
- b) Solo Cal a 4%: 6 CPs (7 e 14 dias);
- c) Solo Cal a 6%: 6 CPs (7 e 14 dias);
- d) Solo Cal a 8%: 6 CPs (7 e 14 dias).

**Figura 9:** Ensaio de Resistência à Compressão Simples



**a)** Ensaio de Compressão Simples



**b)** Corpo de prova rompido

**Fonte:** o autor (2018).

### 3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De posse dos resultados obtidos verificou-se se os mesmos estão dentro dos limites aceitáveis para pavimentação, de acordo as normativas pertinentes do DNIT para construção de pavimento flexível. E buscou-se comparar com trabalhos semelhantes publicados por outros autores.

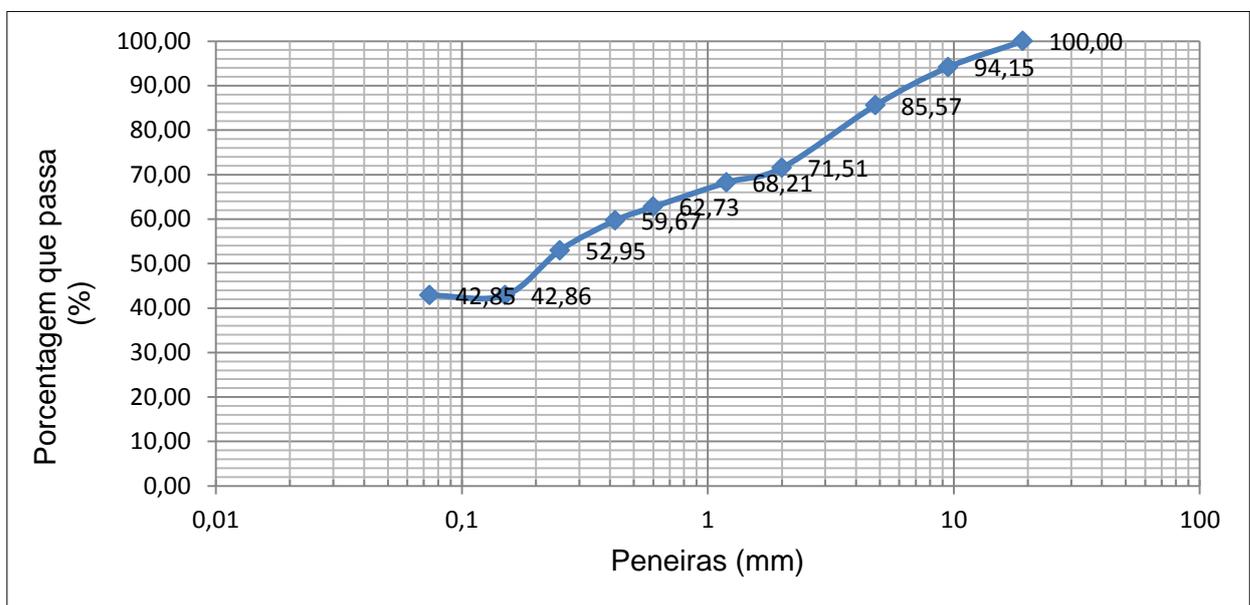
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO NATURAL

#### 4.1.1 Caracterização Física

Os ensaios de caracterização física da amostra, antes da adição de cal mostrou que o solo natural possui um elevado percentual de material fino, visto que 42,85% de suas partículas possuem diâmetro inferior a 0,075 mm, baixo percentual de material grosso, constituindo-se como um solo bem graduado de granulação continua, conforme a apresentado na Figura 10 que apresenta a curva granulométrica.

**Figura 10:** Curva granulométrica do solo natural.



**Fonte:** o autor (2018).

De acordo com o sistema de classificação para fins rodoviários TRB (Transportation Research Board), a amostra coletada é classificada como A-6: Argilas siltosas mediamente plástica com pouco material grosso e índice do grupo igual a 1, conforme apresentado na Tabela 4. A indicação que há grande parcela de material argiloso foi feita a partir dos resultados de LL e IP, uma vez que não foi realizado o ensaio de granulometria por sedimentação do solo.

**Tabela 4:** Caracterização física do solo natural.

LL (%)	IP (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Granulometria passando (%)			IG	TBR
			Material Grosso	Material Fino	Passante na peneira N° 200		
30	11,5	2,74	35,12	28,66	42,85	1	A-6

**Fonte:** o autor (2018).

#### 4.1.2 Caracterização Mecânica

No ensaio de compactação proctor normal, constatou-se que o solo natural possui um teor de umidade ótima de 11,5 % e densidade aparente seca de 1,84 g/cm<sup>3</sup>. Já os resultados do ensaio de resistência a compressão simples realizado com 7 e 14 dias apresentaram uma pequena diferença, visto que não houve emprego do aditivo, resultando em 1,12 e 1,27 Mpa respectivamente. A Tabela 5 apresenta os resultados de caracterização mecânica do solo natural.

**Tabela 5:** Resumo da caracterização mecânica do solo natural.

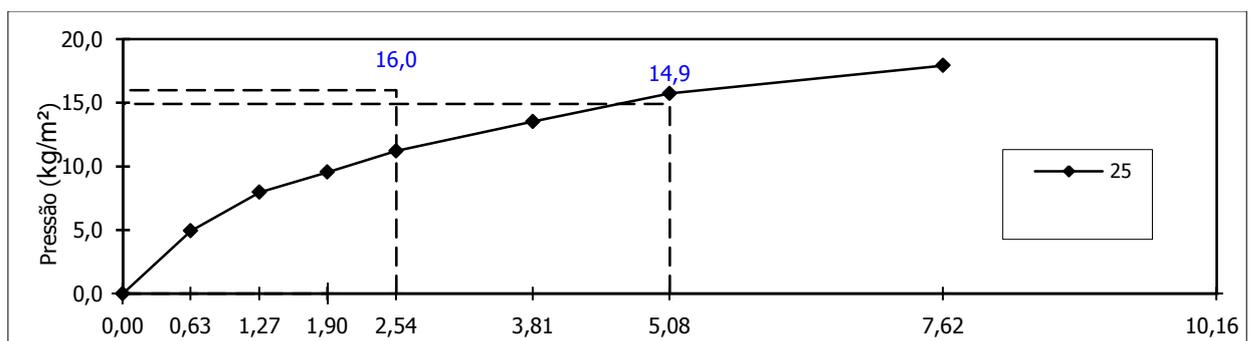
W ótima(%)	Ys máx (g/cm <sup>3</sup> )	Expansão (%)	CBR (%)	Resistência a Compressão Simples (Mpa)	
				7 dias	14 dias
11,5	1,845	3,1	15,45	1,12	1,27

**Fonte:** o autor (2018).

O solo natural atingiu CBR de 15,5% ao se impor uma compactação com 12 golpes, ou seja, ao se compactar a amostra com energia do proctor normal, o resultado é considerado pertinente para solos finos. Segundo o manual de pavimentação do DNIT (2006), solos classificados com A-6 no sistema TRB, possuem CBR de 2 a 15%.

Conforme recomendado pelo DNIT, o material não possui a qualidade necessária para ser utilizado como sub-base, pois possui CBR inferior a 20%, podendo ser utilizado somente como reforço de subleito. A Figura 11 apresenta a curva de penetração do solo natural.

**Figura 11:** Curva de penetração do solo natural.



**Fonte:** o autor (2018).

Com relação a expansão do solo natural (Tabela 5), obteve-se o percentual de 3,1% indicando um solo expansivo ao ser submetido a variações de umidade. Segundo o DNIT para utilização do mesmo como camada de sub-base necessita-se corrigir sua expansibilidade.

## 4.2 ENSAIOS COM A MISTURA SOLO CAL

### 4.2.1 Análise granulométrica

Ao analisar a curva granulométrica das misturas solo cal (Tabela 6), percebe-se que houve redução da granulometria passante com o aumento da dosagem de cal hidratada. Esse resultado mostra que ocorreu uma mudança granulométrica do solo, como se houvesse um pequeno aumento do diâmetro das partículas finas do solo.

**Tabela 6:** Análise granulométrica da mistura solo-cal.

Mistura	Granulometria passando (%)		
	Material Grosso	Material Fino	Passante na peneira 200
Solo Natural	35,12	28,66	42,85
Solo-cal 4%	35,09	27,88	40,30
Solo-cal 6%	34,99	27,12	38,26
Solo-cal 8%	34,95	26,46	36,09

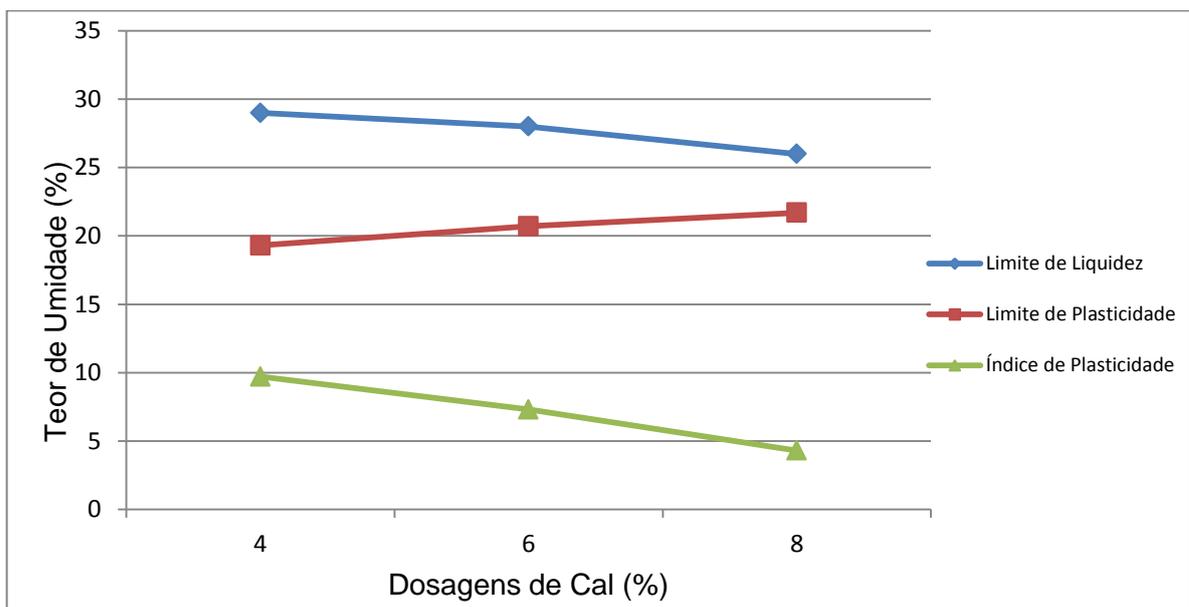
**Fonte:** o autor (2018)

De acordo Correa et al, (2009) a reação cal / solo inicia-se quase imediatamente, devido à alteração do pH que o meio alcalino cal provoca no solo. Sendo que, as reações de floculação e aglomeração das partículas ocorrem em primeiro lugar, aumentando seu tamanho, acompanhadas da troca iônica entre as argilas presentes no solo e a cal.

### 4.2.2 Limites de consistência

Os resultados dos limites de consistência apontam para redução do índice de plasticidade do solo com o acréscimo de teores crescente de cal, bem como do limite de liquidez, conforme se observa na Figura 12.

**Figura 12:** Limites de consistência da mistura solo-cal.



**Fonte:** o autor (2018).

Analisando a figura 2 observa-se que a adição da cal influencia muito na plasticidade e na textura do solo, visto que o solo natural sem adição de cal apresentou uma plasticidade média e após a adição de 8% de cal se tornou pouco plástico com  $IP = 4,3\%$ . Resultados semelhantes de redução do índice de plasticidade foram obtidos por Portelinha (2008), Goularte e Silva (2009), ambos autores utilizaram a cal em suas pesquisas.

Paiva et al. (2016) atribuiu que as rápidas mudanças nos valores dos limites de Atterberg com adição de cal, devem-se as transformações estruturais e floculação do material. Segundo o autor, as alterações nos limites de consistência são consequência do fornecimento de elétrons para o equilíbrio das cargas. A cal supre a deficiência por carga elétrica positiva, diminui a afinidade do mineral expansivo por água e outros íons, o que diminui a expansão e altera a plasticidade do solo.

#### 4.2.3 Compactação da mistura solo cal

Os ensaios de compactação foram executados em amostras de 4, 6 e 8% de cal em peso. Ao observar os resultados obtidos (Tabela 7), percebeu-se que com o aumento da dosagem de cal ocorreu o aumento da umidade ótima. Isso significa que a cal hidratada age na mistura de maneira a absorver uma quantidade de água, evitando assim que o solo se torne supersaturado.

**Tabela 7:** Compactação das misturas solo-cal.

Dosagem de cal (%)	W ótima(%)	Ys máx (g/cm <sup>3</sup> )
4	12,1	1,850
6	12,4	1,838
8	13,3	1,827

**Fonte:** o autor, 2018.

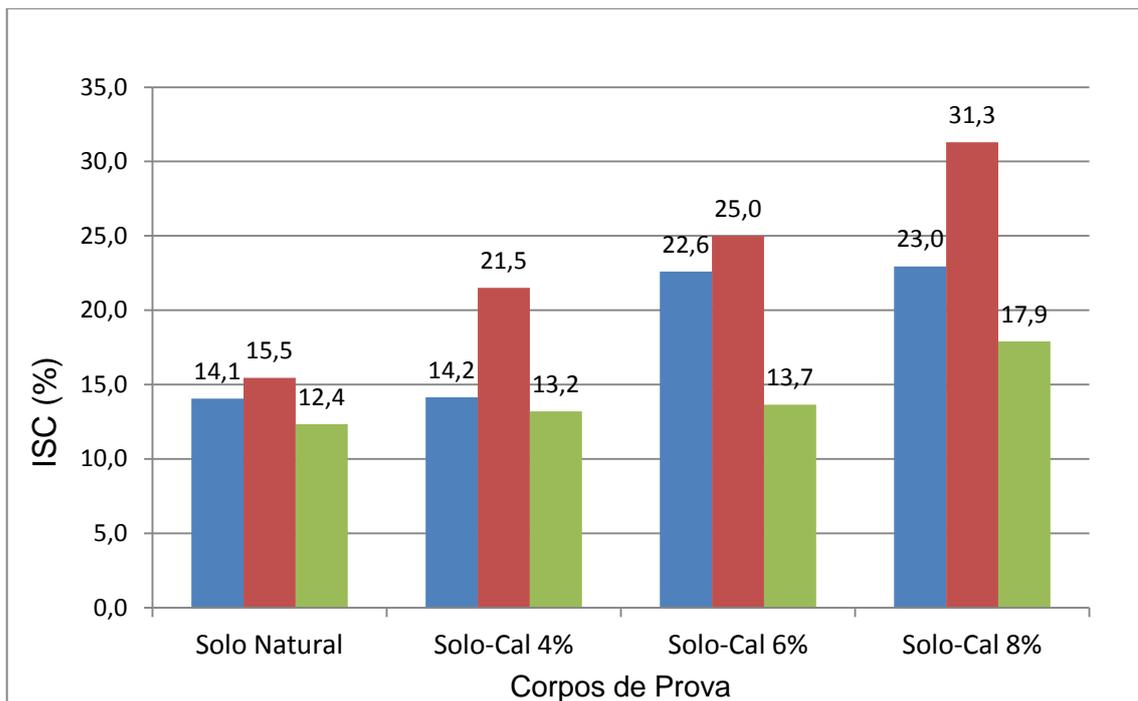
No entanto ao analisar a massa específica aparente seca máxima, verificou-se o contrário, ou seja, com aumento do teor da cal ocorre a redução da massa específica seca (Tabela 7). Uma diminuição geral do  $\gamma_d$  significa que a amostra perde seu peso sem alterar seu volume, ou seja, se torna um material mais leve sem diminuir propriedades volumétricas.

Silva (2010) avaliou as dosagens de 6, 8 e 10% de cal para estabilização de um solo arenoso siltoso. Em seu trabalho, observou que para uma mesma energia de compactação, ocorre uma diminuição da massa específica seca máxima com o acréscimo de cal, segundo o autor tal fato ocorre pela dificuldade que quebrar as agregações formadas através da reação de hidratação.

#### 4.2.2 Capacidade de Suporte e expansão

Ao analisar os resultados obtidos, verificou-se a eficiência das dosagens de cal no melhoramento do solo quando comparado ao solo natural. Os valores de CBR atingidos com os teores de 4, 6 e 8% de cal foram satisfatórios, estando acima do limite recomendado pelo DNIT para utilização com camada de sub-base. A Figura 13 a seguir apresenta o CBR das misturas solo cal.

**Figura 13:** CBR das misturas solo cal.



**Fonte:** o autor, 2018.

Em ambas as dosagens de cal o corpo de prova que atingiu maior CBR foi o compactado na  $W$  ótima (%), representado por cor vermelha (Figura 13). É possível notar uma relação diretamente proporcional entre as dosagens e o CBR, pois com o aumento da dosagem de cal ocorre também o aumento da capacidade suporte do solo.

A variação do teor de cal de 4% para 6% elevou o CBR médio dos solos estudados de 21,5% para 25% o que representa um ganho de resistência de 16% com acréscimo de apenas 2% na adição da cal. Para o teor de 8% a resistência média atingiu um CBR de 31,3% o que representa um ganho de resistência de 25% em relação ao teor de 6%.

No entanto, conforme observado a dosagem de 4% de cal hidratada já é suficiente para enquadrar o solo nos limites aceitáveis do DNIT para utilização na camada de sub-base. Ao analisar a viabilidade financeira entre as dosagens, nota-se uma economia ao utilizar a menor

dosagem, visto que há redução na quantidade de cal e no volume de água utilizado, tornando-se assim uma opção eficiente e viável.

Com relação à expansão das misturas solo cal, na adição de 4, 6 e 8% de cal a grande maioria das amostras atingiram expansão inferior a 1%, estando de acordo com o recomendado pelo DNIT para camada de sub-base. Com exceção das amostras ligeiramente mais secas nos teores de 4 e 6% (Tabela 8).

**Tabela 8:** Expansão das misturas Solo cal.

Corpo de Prova	Expansão (%)		
	Solo Cal 4%	Solo Cal 6%	Solo Cal 8%
1	1,76	1,32	0,79
2	0,70	0,62	0,53
3	0,44	0,18	0,13

**Fonte:** o autor (2018).

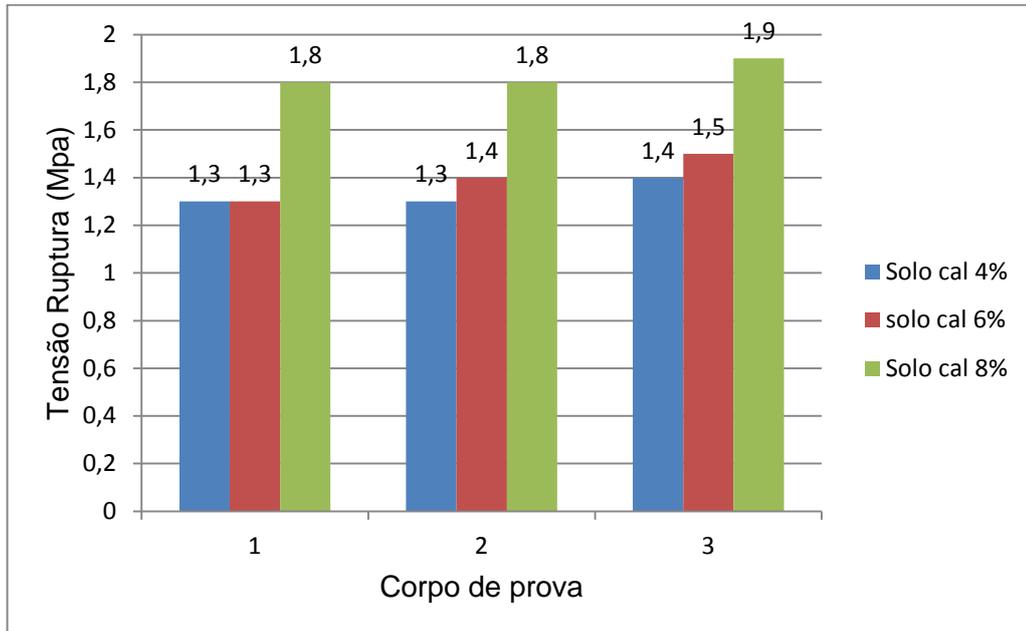
As amostras compactadas na umidade ótima que obtiveram a maior capacidade suporte atingiram uma redução de expansão de 77,42, 80,0 e 82,90% para os teores de 4, 6 e 8% de cal hidratada, ao compara-las com a expansão do solo natural de 3,1%, demonstrando alta eficiência da estabilização solo-cal na redução de expansão.

Para a adição de 8% de cal, verificou-se uma maior redução do potencial de expansão do que as adições de 4 e 6% (Tabela 8). O que pode está relacionado com o aumento da umidade ótima, pois ao se adicionar água contribui para que o solo já inicie o seu processo de expansão, diminuindo assim o seu potencial de expansão.

#### 4.2.3 Resistência à compressão simples

Terminado o tempo de cura de 7 dias os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão simples, resultando no valor da tensão de ruptura do corpo de prova. Os valores das tensões de ruptura correspondentes a cada dosagem são apresentados na Figura 14.

Considerando que não há norma de especificação do DNIT contemplando a resistência à compressão de misturas solo-cal para base ou sub-base, buscou-se comparar com a norma de resistência à compressão simples para bases solo-cimento (DNIT 143/2010), na qual deve ter o valor mínimo de 2,1 Mpa após 7 dias de cura.

**Figura 14:** Resistência à compressão Simples das misturas solo cal com 7 dias de cura.

**Fonte:** o autor (2018)

Conforme observado na Figura 13 o teor de 8% de cal obteve as maiores tensões de ruptura. E assim como no ensaio de CBR podemos indicar uma relação diretamente proporcional para entre a dosagem de cal e a resistência a compressão.

**Tabela 9:** Resistência à compressão simples das misturas solo cal com 7 dias de cura.

Dosagem	Tensão de Ruptura (Mpa)			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média
Solo-cal 4%	1,3	1,3	1,4	1,32
Solo-cal 6%	1,3	1,4	1,5	1,39
Solo-cal 8%	1,8	1,8	1,9	1,82

**Fonte:** o autor (2018).

Ao comparar a resistência do solo natural (Tabela 5) com os resultados obtidos pelas misturas após 7 dias de cura (Tabela 9), percebe-se que as dosagens de 4, 6 e 8% de cal geraram um alto ganho de resistência de 17,85, 24,11 e 62,5% respectivamente. Porém esses valores não foram suficientes para atingir o padrão mínimo recomendado pelo DNIT de 2,1 Mpa para solo-cimento.

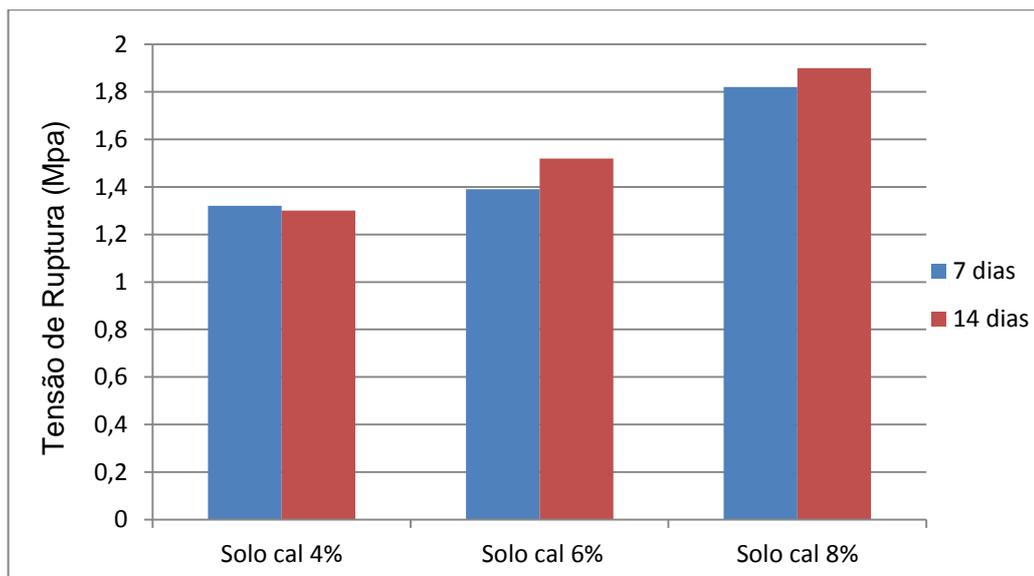
Os resultados da resistência à compressão após 14 dias de cura apresentados na tabela 10, não apresentaram diferenças significativas com relação ao de 7 dias de cura. Pode-se notar que apenas os teores de 6 e 8% de cal apresentaram maior ganho de resistência.

**Tabela 10:** Resistência à compressão simples das misturas solo cal com 14 dias de cura.

Dosagem	Tensão de Ruptura (Mpa)			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média
Solo-cal 4%	1,40	1,20	1,30	1,30
Solo-cal 6%	1,40	1,60	1,50	1,52
Solo-cal 8%	1,70	1,90	2,10	1,90

**Fonte:** o autor (2018).

A Figura 15 apresenta um gráfico comparativo entre as tensões de ruptura nos dois tempos de cura analisados. Pode-se observar que com exceção da dosagem 4 % de cal, a cura de 14 dias foi responsável pelas maiores tensões obtidas, representada na cor vermelha.

**Figura 15:** Resistência à Compressão Simples aos 7 e 14 dias de cura.

**Fonte:** o autor (2018).

De acordo com Azevêdo (2010), mesmo se tratando de um solo argiloso, a reação cimentante em tese irá ocorrer, mas é um processo progressivo e lento que pode demorar meses para se concluir. Em grande parte do tempo, ocorrem reações elétricas entre partículas da argila e as de cal, como trocas de íons apenas. Por este motivo, os resultados em termos de resistência à compressão simples com 14 dias de cura são menores do que o esperado.

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo avaliou os resultados obtidos das mistura de solo puro com proporções de cal para o aumento de sua resistência, a fim de ser utilizado como camada de sub-base em pavimento urbano, de modo a utilizar uma técnica alternativa e econômica para solucionar o problema de descarte de materiais não aproveitados e gastos excessivos com transporte.

Os ensaios de caracterização do solo natural indicaram que a amostra apresenta características insatisfatórias para ser utilizada em camada de sub-base de um pavimento, podendo ser empregada somente com reforço do sub-leito, justificando assim o objetivo desta pesquisa.

Ao adicionar 4, 6 e 8% de cal verificou-se que a estabilização solo-cal é eficiente na redução da expansão e plasticidade e no aumento da resistência do solo. Uma vez que, em todas as dosagens de cal hidratada avaliadas houve o aumento a capacidade suporte e a resistência à compressão simples do solo natural.

Os resultados indicaram também uma relação diretamente proporcional entre a dosagem de cal e a resistência do solo. Sendo que os melhores resultados obtidos de CBR e resistência à compressão simples ocorreram na dosagem de 8% de cal, aumentado o CBR do solo natural de 15 para 31,% e a resistência a compressão de 1 para 1,9 Mpa em 14 dias de cura.

No entanto, observou-se que a dosagem de 4 % de cal é suficiente para tornar o solo aceitável para utilização em camada de sub-base segundo o DNIT, o que representa viabilidade econômica visto que nesta dosagem se utiliza menor quantidade de cal e água.

Em relação aos tempos de cura empregados no ensaio de resistência a compressão, foi possível notar que os resultados obtidos com 7 dias de cura diferiram pouco dos resultados aos 14 dias cura. Como Sugestão para trabalhos futuros seria interessante analisar um maior tempo de cura como de 28 dias.

## 6 REFERÊNCIAS

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 6508**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 6457**: Amostra de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 9604**: Amostra de Solo - Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 9895**: - Solo - Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR MB 3361**: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1990.

AZEVÊDO, A. L. C. **Estabilização de solos com adição de cal – um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem após a adição de cal**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2010.

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

BEHAK, L. **Análise estrutural de pavimentos de baixo volume de tráfego revestidos com solo modificado com cal considerando ensaios laboratoriais e monitoramento de trechos experimentais**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2013.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 1º Edição, Rio de Janeiro: Editora ABEDA, 2006.

CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. A.; JOHN, V. M.; Cal na Construção Civil. In: ISAIA, Geraldo Cechella. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. Volume 1. p. 695 - 726.

CORRÊA, J. F.; MARCON, A. M.; TRICHES, G. Melhoria das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal. In: **Congresso de Infraestrutura de Transportes (CONINFRA) 2009**. São Paulo.

CORRÊA, J. F. **Avaliações das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação**.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

COUTINHO, Joana de Sousa. **Materiais de Construção 2: 1ª Parte – Ligantes e Caldas**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP. 2006.

CONSOLI, N. C., THOMÉ, A., CERATTI, J. A. P., **Engineering properties of organic soft soil-lime mixtures. Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, Bakema, 1, 217-222.** 1997

CRISTELO, N.M.C. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos através da adição de Cal**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade de Minho, Braga – Portugal, 2011.

DALLA ROSA J. A.; **Metodologias para a previsão do comportamento mecânico e para a análise da variação da porosidade de um solo siltoso tratado com cal em diferentes tempos de cura**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2013.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação**, 3 ed, Rio de Janeiro, 274 p. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 080/94: **Solos – análise granulométrica por peneiramento**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 122/94: **Solos – determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 82/94: **Solos – determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT 172/16: **Solos – determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Brasília, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER 164/2013: **Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

NORMA DNIT 143/2010 - **ES: Pavimentação - Base de solo-cimento - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro. 2010a.

GOULARTE, C. L.; SILVA, P. C. L. **Estabilização química de solo com adição de cimento ou cal como alternativa de pavimento**. 2009.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal- Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2ª ed. São Paulo: PINI, 2002.

INGLES, O. G.; METCALF, J.B. Soil Stabilization: principles and practices. Sydney: Butterworths, 1972.

LOPES, L. D. S. E., **Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Rio de JaneiroRJ: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.

MAKUSA, G. P. Soil stabilization methods and materials: In engineering practice. Luleå – Sweden: Luleå University of Technology, 2012. Disponível em: <  
[https://pure.ltu.se/portal/files/42050076/Soil\\_stabilization\\_methods\\_and\\_materials.pdf](https://pure.ltu.se/portal/files/42050076/Soil_stabilization_methods_and_materials.pdf)>.  
Acesso em: 14 mai. 2016.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Apostila de estabilização de solos**. Rio de Janeiro: UFRJ, Escola de Engenharia: 2004.

NEVES, C. M. M. ; FARIA, O. B.; ROTONDARO, R. ; SALAS, P. C. ; HOFFMANN, 2009. **Seleção de Solos e Métodos de Controle em Construção com Terra – Práticas de Campo**. Rede Ibero-americana PROTERRA. Disponível em <http://www.redproterra.org>. Acessado em 22 de março de 2018.

PAIVA, S.C.; LIMA, M.A.A.; FERREIRA, M.G.V.X.; FERREIRA, S.R.M. Propriedades Geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. **Revista Matéria**. V21 N02, , pp.437-449, 2016.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PORTELINHA, F. H. M., 2008. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica**. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Viçosa, 161 p.

SANTANNA, S. A. **Estudo do Comportamento de Solos Artificiais em Função da Variação das Características de Sua Fração Grossa**. 1998. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SANTOS, Jorge Filipe Ribeiro dos. **Estudos de formulação de solo-cimento e solo-cal e respectivas aplicações**. 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente) – Instituto Superior de Engenharia do Porto – ISEP. 2008.

SANTOS **Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra** 2012.

SARTORI, G. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de campo mourão**. 2015.53f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campo Mourão, 2015.

SENÇO, W., **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1997. 746 p. v. 1. Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial. – Brasília : CNT : SEST : SENAT, 2017.

SNV – SISTEMA NACIONAL DE VIAÇÃO. SNV 2014 – Atualizado até 16/09/2014: 1-SNV 2014 COMPLETO – Rede rodoviária sob jurisdição do Ministério dos Transportes.

SILVA, J. M. A.M. Propriedades geotécnicas de expansão de um solo argiloso compactado com e sem adição de cal. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 3, n. 4, p.57-72, dez. 2016.

SILVA, M. F. **Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal**. 2010. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

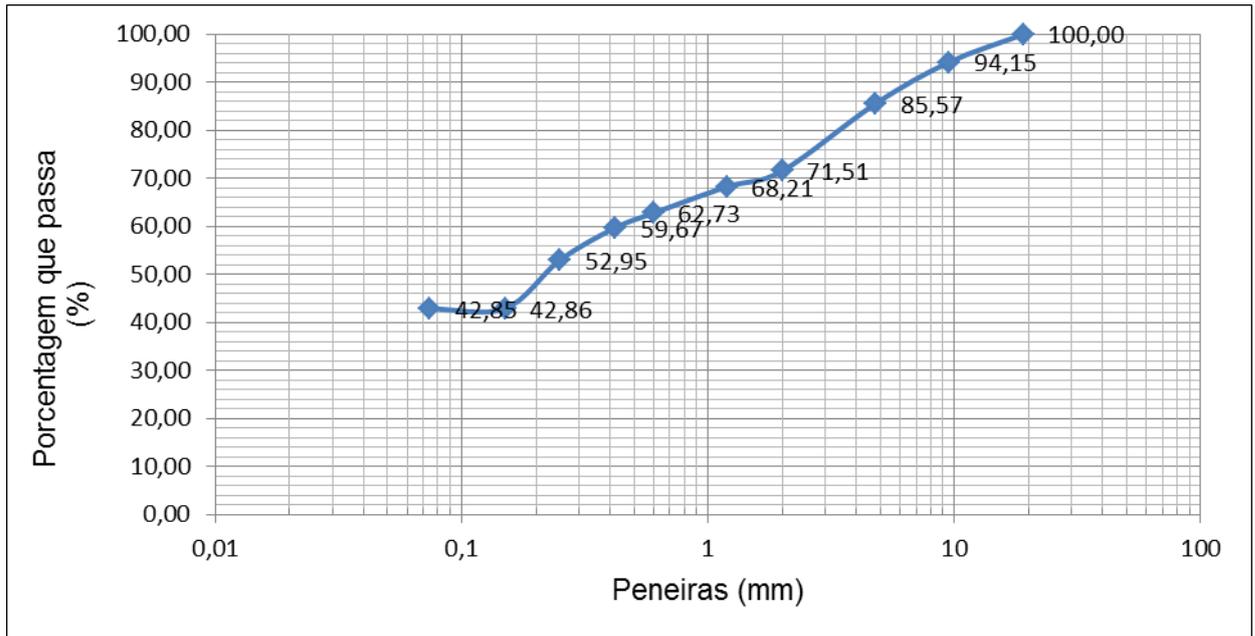
SOUSA, A.T. **Estudo de parâmetros de dois tipos de solos característicos do Distrito Federal estabilizados com cal**. 2013. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Brasília - UniCEUB, Brasília, 2014.

## 7 APÊNDICES

## SOLO NATURAL

- Análise Granulométrica

SOLICITANTE: Thaynara Lang de Oliveira			FONE:		
MATERIAL: Solo Natural			DATA: 14/09/2018		
TRECHO:			MUNICÍPIO: Palmas		
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA - NBR - 7181					
Φ peneira (mm)	massa retirada (g)	% retida em cada peneira	% retida acumulada	% que passa em cada peneira	
19,1	0	0,00	0,00	100,00	
9,5	58,5	5,85	5,85	94,15	
4,8	85,8	8,58	14,43	85,57	
2	140,6	14,06	28,49	71,51	
1,19	33	3,30	31,79	68,21	
0,6	54,8	5,48	37,27	62,73	
0,42	30,6	3,06	40,33	59,67	
0,25	67,2	6,72	47,05	52,95	
0,15	100,9	10,09	57,14	42,86	
0,074	0,1	0,01	57,15	42,85	
Σ	1000	100,00			



- **Limite de Consistência e Massa Específica dos grãos**

LIMITE DE LIQUIDEZ - NBR-6459								
Determinação	#	1	2	3	4	5	6	7
Cápsula	#	1	2	3	4	7		
Massa Solo Úmido + Cápsula	(g)	46,00	46,20	44,40	42,70	51,40		
Massa Solo Seco + Cápsula	(g)	40,00	39,70	38,20	36,20	41,80		
Massa da Cápsula	(g)	17,80	17,20	17,30	17,00	18,50		
Massa da Água	(g)	6,00	6,50	6,20	6,50	9,60		
Massa Solo Seco	(g)	22,20	22,50	20,90	19,20	23,30		
Teor de Umidade	(%)	27,03	28,89	29,67	33,85	41,20		
Número de Golpes	#	37	31	25	19	13		

LIMITE DE PLASTICIDADE - NBR-7180								
Determinação	#	1	2	3	4	5	6	7
Cápsula	#	3	4	6	18	24		
Massa Solo Úmido + Cápsula	(g)	9,30	9,20	9,60	9,10	9,70		
Massa Solo Seco + Cápsula	(g)	9,10	9,00	9,40	8,90	9,50		
Massa da Cápsula	(g)	8,05	7,90	8,35	7,80	8,40		
Massa da Água	(g)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20		
Massa Solo Seco	(g)	1,05	1,10	1,05	1,10	1,10		
Teor de Umidade	(%)	19,05	18,18	19,05	18,18	18,18		

CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DA MÉDIA ( $\bar{L}_P$ )				
#	$\bar{L}_P$	$0,95 \cdot \bar{L}_P$	$1,05 \cdot \bar{L}_P$	Ñ Serve
1	18,53	17,60	19,45	

$LL = A \cdot \ln(N^\circ \text{ de Golpes}) + B$	
A	13,34
B	74,222
<b>Limite de Liquidez (LL)</b>	<b>30,0</b>
<b>Limite de Plasticidade (LP)</b>	<b>18,5</b>
<b>Índice de Plasticidade (IP)</b>	<b>11,5</b>

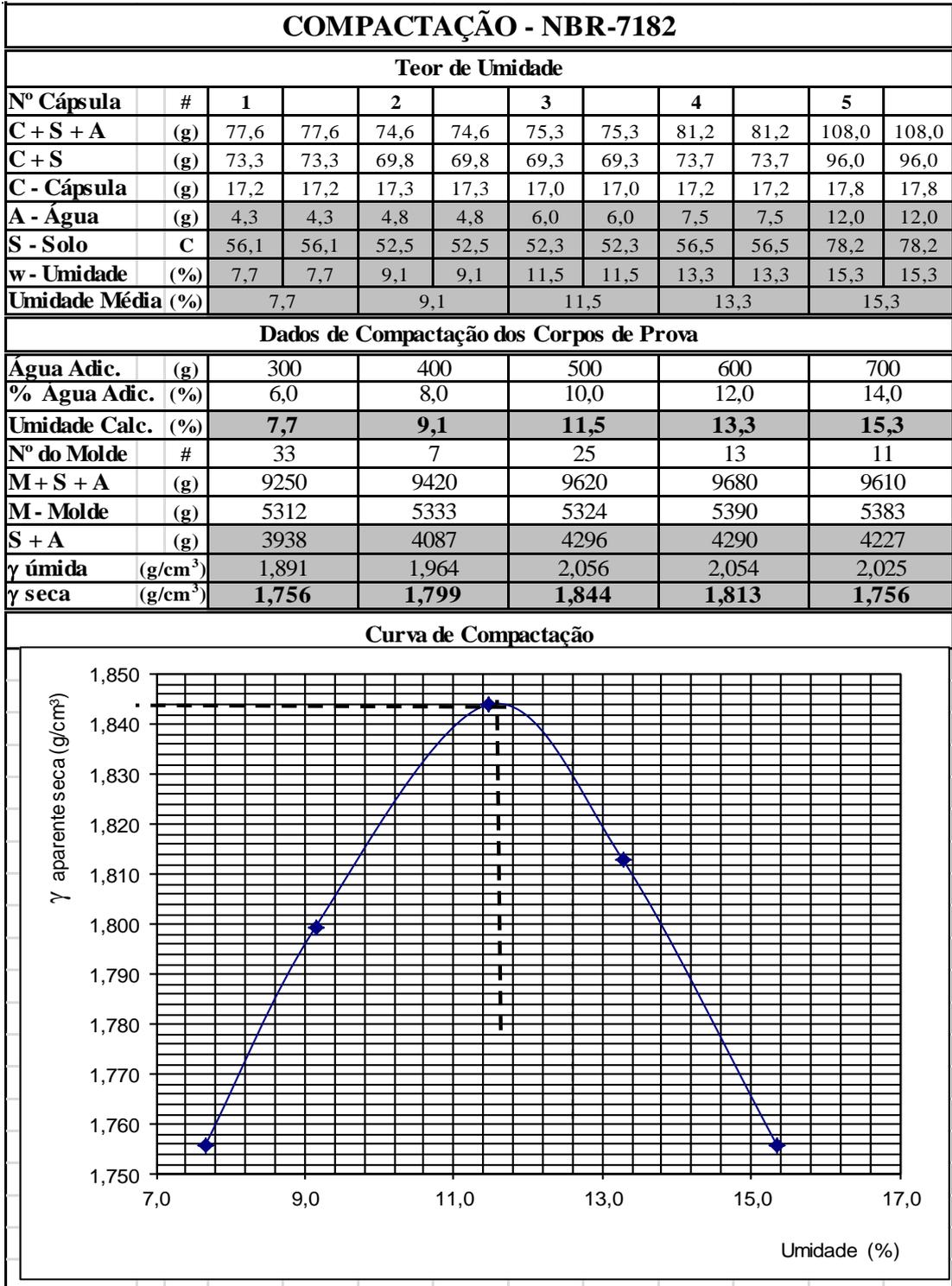
  
  

MASSA ESPECÍFICA - Grãos que passam na # 4,8mm - NBR-6508			
Picnômetro N°	#	1	2
Teor de Umidade	(%)		
Massa Solo Úmido	(g)	76,8	76,8
Massa Picnômetro+Solo+Água, T°C de Ensaio	(g)	659,40	667,10
Massa Picnômetro Cheio de Água	(g)	627,60	635,40
Temperatura de Ensaio	(°C)	24	24
Massa Solo Seco	(g)	50,00	50,00
Massa Específica da Água, T°C de Ensaio	(g/cm <sup>3</sup> )	0,9981	0,9981
Massa Específica dos Grãos	(g/cm <sup>3</sup> )	2,75	2,73
Massa Específica dos Grãos Média	(g/cm <sup>3</sup> )	2,74	

Observações Gerais			
A massa específica do solo em questão foi obtida a partir de amostra seca em estufa a 105°C			
Visto			

- Compactação



- CBR

**ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA  
EXPANSÃO**

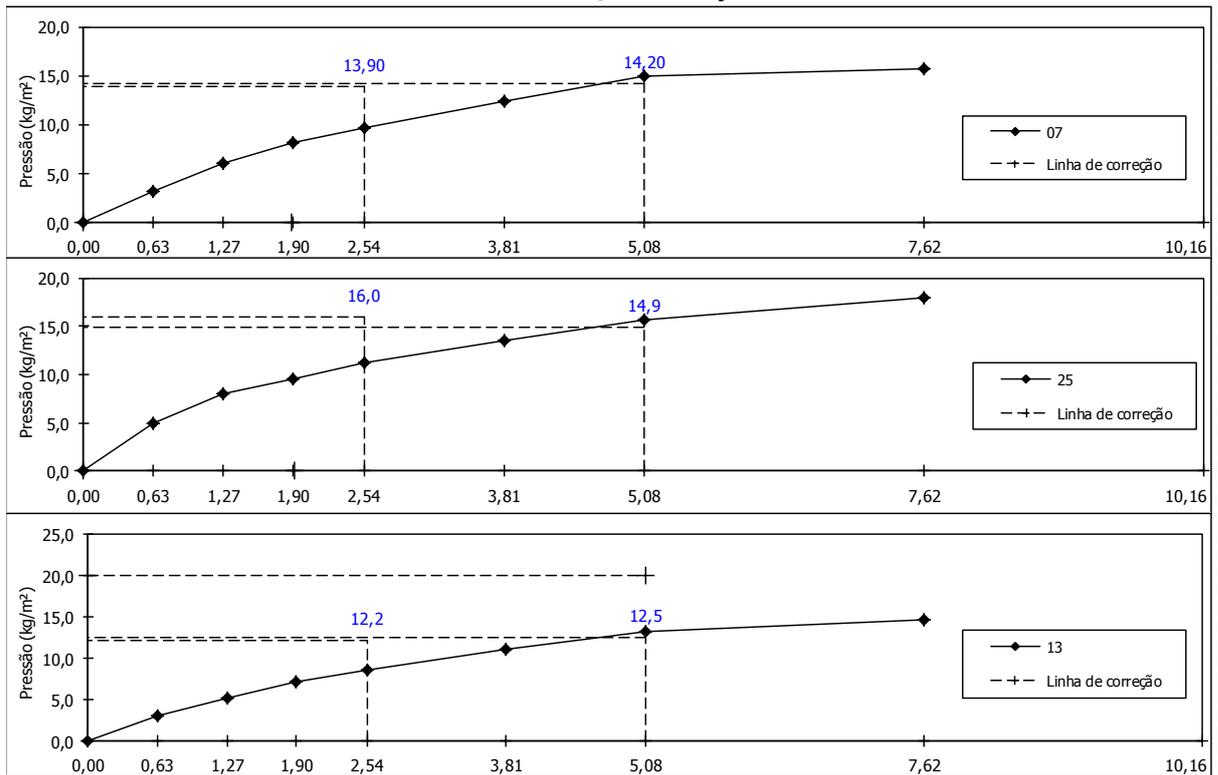
Molde (Nº)			07			25			13		
Altura do molde (cm)			11,38			11,38			11,38		
			Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.
Data	Hora		(mm)	(mm)	%	(mm)	(mm)	%	(mm)	(mm)	%
27/09/2004	seg	14:00	4,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
28/09/2004	ter	14:00									
29/09/2004	qua	14:00									
30/09/2004	qui	14:00									
01/10/2004	sex	14:00	9,00	5,00	<b>4,39</b>	5,50	3,50	<b>3,08</b>	3,50	2,50	<b>2,20</b>
Cil. +am. após embebição											
Peso da água absorvida											

Anel dinamométrico
DIN 001
Constante do anel
0,10485
Relógio comparador
EXT 001
Área do pistão (cm²)
19,3221

**PENETRAÇÃO**

Tempo	Penetração			Pressão Padrão	Molde 07				Molde 25				Molde 13			
	mm	Pol.			Leitura	Pressão Kg/m²		ISC	Leitura	Pressão Kg/m²		ISC	Leitura	Pressão Kg/m²		ISC
Min.				mm	Calcul.	Corrig.	%	mm	Calcul.	Corrig.	%	mm	Calcul.	Corrig.	%	
-	-	-	-	-												
0,5	0,63	0,025	-	30	3,15			47	4,9			29	3,0			
1,0	1,27	0,050	-	58	6,08			76	8,0			50	5,2			
1,5	1,90	0,075	-	78	8,18			91	9,5			68	7,1			
2,0	2,54	0,100	70,31	93	9,75	9,8	<b>13,9</b>	107	11,2	11,2	<b>16,0</b>	82	8,6	8,6	<b>12,2</b>	
3,0	3,81	0,150	-	118	12,37			129	13,5			106	11,1			
4,0	5,08	0,200	105,46	143	14,99	15,0	<b>14,2</b>	150	15,7	15,7	<b>14,9</b>	126	13,2	13,2	<b>12,5</b>	
6,0	7,62	0,300	-	150	15,73			171	17,9			140	14,7			
8,0	10,16	0,400	-													
10,0	12,70	0,500	-													

**Curvas de Pressão / Penetração do I.S.C**



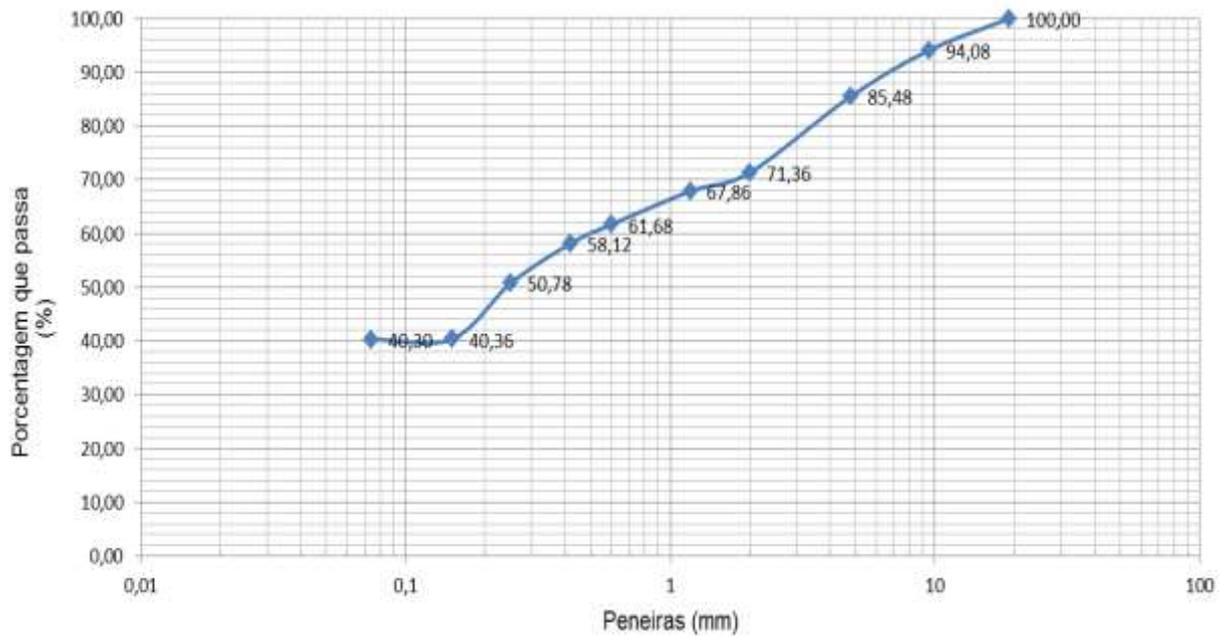
- Resistência a Compressão Simples



- Análise Granulométrica

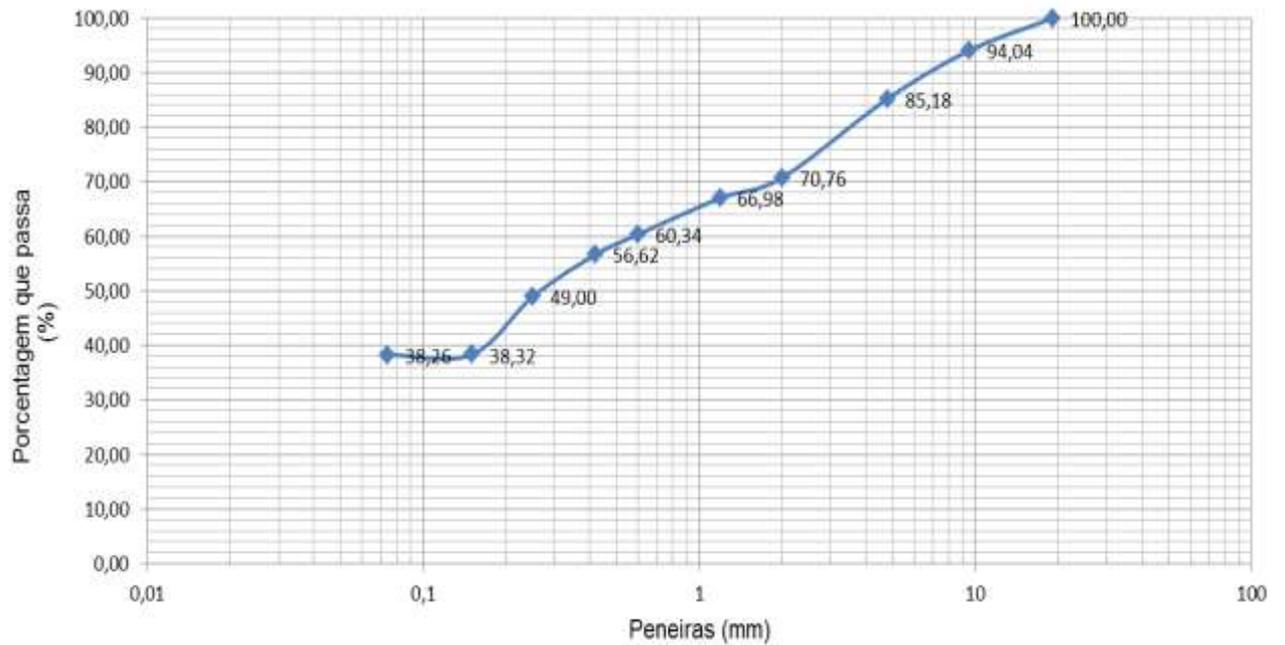
<b>SOLICITANTE:</b> Thaynara Lang de Oliveira	<b>FONE:</b>
<b>MATERIAL:</b> Solo Cal 4%	<b>DATA:</b> 14/09/2018
<b>TRECHO:</b>	<b>MUNICÍPIO:</b> Palmas
<b>ANÁLISE GRANULOMÉTRICA - NBR - 7181</b>	

Φ peneira (mm)	massa retirada (g)	% retida em cada peneira	% retida acumulada	% que passa em cada peneira
19,1	0	0,00	0,00	100,00
9,5	59,2	5,92	5,92	94,08
4,8	86	8,60	14,52	85,48
2	141,2	14,12	28,64	71,36
1,19	35	3,50	32,14	67,86
0,6	61,8	6,18	38,32	61,68
0,42	35,6	3,56	41,88	58,12
0,25	73,4	7,34	49,22	50,78
0,15	104,2	10,42	59,64	40,36
0,074	0,6	0,06	59,70	40,30
Σ	1000	100,00		



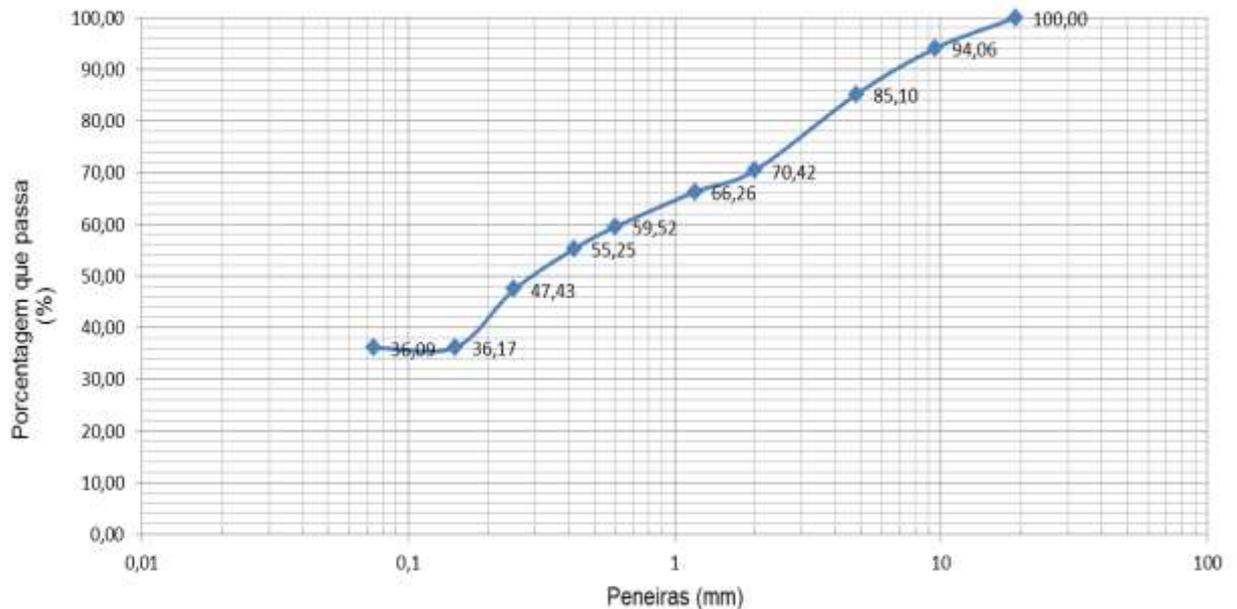
<b>SOLICITANTE:</b> Thaynara Lang de Oliveira	<b>FONE:</b>
<b>MATERIAL:</b> Solo Cal 6%	<b>DATA:</b> 14/09/2018
<b>TRECHO:</b>	<b>MUNICÍPIO:</b> Palmas
<b>ANÁLISE GRANULOMÉTRICA - NBR - 7181</b>	

<b>Φ peneira (mm)</b>	<b>massa retirada (g)</b>	<b>% retida em cada peneira</b>	<b>% retida acumulada</b>	<b>% que passa em cada peneira</b>
19,1	0	0,00	0,00	100,00
9,5	59,6	5,96	5,96	94,04
4,8	88,6	8,86	14,82	85,18
2	144,2	14,42	29,24	70,76
1,19	37,8	3,78	33,02	66,98
0,6	66,4	6,64	39,66	60,34
0,42	37,2	3,72	43,38	56,62
0,25	76,2	7,62	51,00	49,00
0,15	106,8	10,68	61,68	38,32
0,074	0,6	0,06	61,74	38,26
Σ	1000	100,00		



<b>SOLICITANTE: Thaynara Lang de Oliveira</b>		<b>FONE:</b>
<b>MATERIAL: Solo Cal 8%</b>		<b>DATA: 14/09/2018</b>
<b>TRECHO:</b>		<b>MUNICÍPIO: Palmas</b>
<b>ANÁLISE GRANULOMÉTRICA - NBR - 7181</b>		

$\Phi$ peneira (mm)	massa retirada (g)	% retida em cada peneira	% retida acumulada	% que passa em cada peneira
19,1	0	0,00	0,00	100,00
9,5	59,4	5,94	5,94	94,06
4,8	89,6	8,96	14,90	85,10
2	146,8	14,68	29,58	70,42
1,19	41,6	4,16	33,74	66,26
0,6	67,4	6,74	40,48	59,52
0,42	42,7	4,27	44,75	55,25
0,25	78,2	7,82	52,57	47,43
0,15	112,6	11,26	63,83	36,17
0,074	0,8	0,08	63,91	36,09
$\Sigma$	1000	100,00		



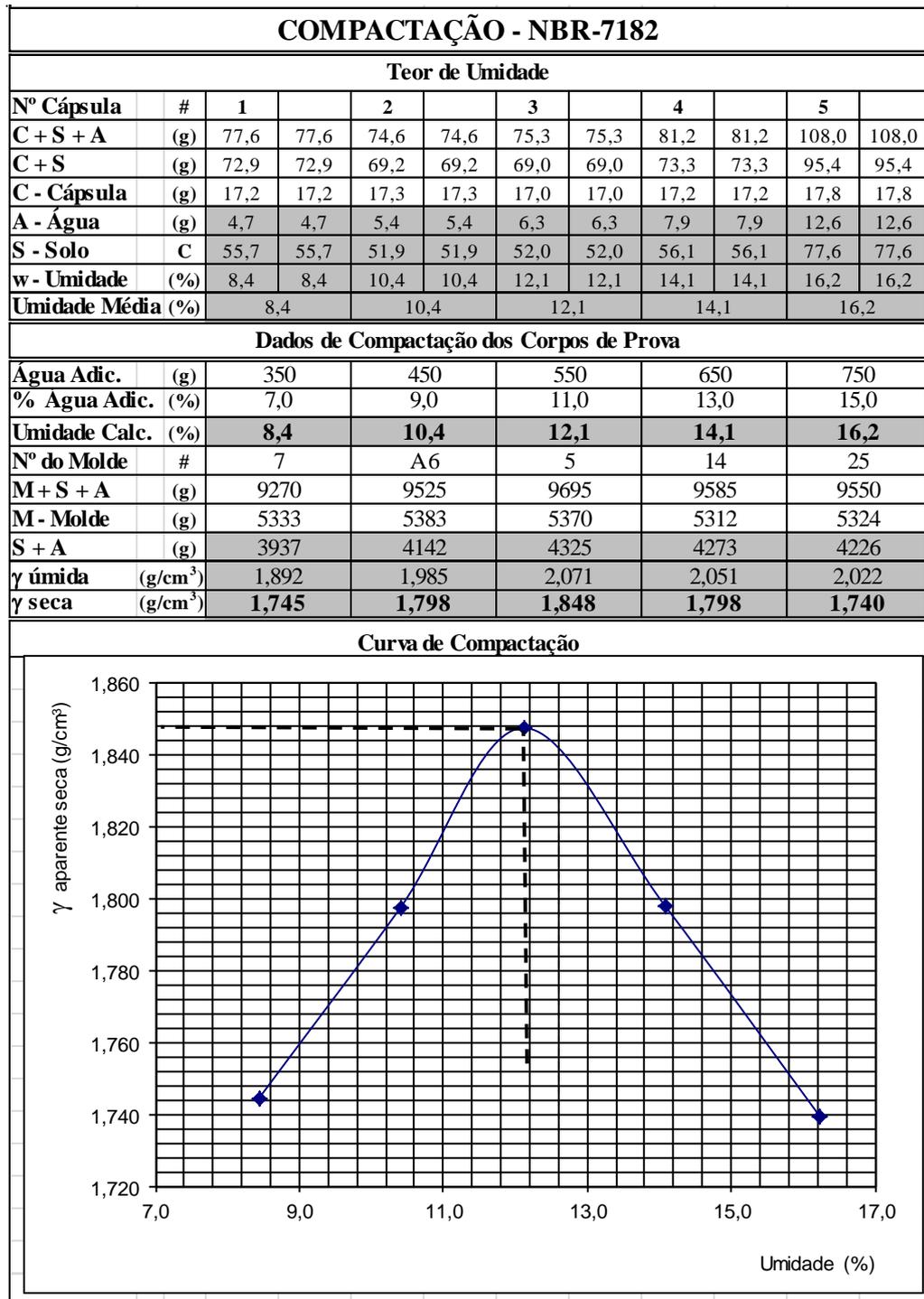
- **Limites de Consistência**

LABORATÓRIO DE SOLOS E ROCHAS								
<b>Solicitante:</b>	Thaynara Lang de Oliveira	<b>Fone:</b>		<b>Data:</b>	25/09/2018			
<b>Descrição:</b>	Solo cal 4%	<b>Estaca:</b>		<b>Reg. N°:</b>				
<b>Trecho:</b>		<b>Prof (m):</b>		<b>Amostra:</b>				
<b>Obs:</b>								
LIMITE DE LIQUIDEZ - NBR-6459								
<b>Determinação</b>	<b>#</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Cápsula</b>	<b>#</b>	1	2	3	4	7		
<b>Massa Solo Úmido + Cápsula</b>	<b>(g)</b>	46,00	46,20	44,40	42,70	51,40		
<b>Massa Solo Seco + Cápsula</b>	<b>(g)</b>	40,00	39,70	38,20	36,20	41,80		
<b>Massa da Cápsula</b>	<b>(g)</b>	15,00	16,80	18,00	16,00	18,50		
<b>Massa da Água</b>	<b>(g)</b>	6,00	6,50	6,20	6,50	9,60		
<b>Massa Solo Seco</b>	<b>(g)</b>	25,00	22,90	20,20	20,20	23,30		
<b>Teor de Umidade</b>	<b>(%)</b>	24,00	28,38	30,69	32,18	41,20		
<b>Número de Golpes</b>	<b>#</b>	37	31	25	19	13		
LIMITE DE PLASTICIDADE - NBR-7180								
<b>Determinação</b>	<b>#</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Cápsula</b>	<b>#</b>	3	4	6	18	24		
<b>Massa Solo Úmido + Cápsula</b>	<b>(g)</b>	9,30	9,25	9,60	9,10	9,70		
<b>Massa Solo Seco + Cápsula</b>	<b>(g)</b>	9,10	9,04	9,40	8,90	9,48		
<b>Massa da Cápsula</b>	<b>(g)</b>	8,05	7,95	8,40	7,85	8,50		
<b>Massa da Água</b>	<b>(g)</b>	0,20	0,21	0,20	0,20	0,22		
<b>Massa Solo Seco</b>	<b>(g)</b>	1,05	1,09	1,00	1,05	0,98		
<b>Teor de Umidade</b>	<b>(%)</b>	19,05	19,27	20,00	19,05	22,45		
	<b>CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DA MÉDIA (LP)</b>							
		<b>#</b>	<b>LP</b>	<b>0,95.LP</b>	<b>1,05.LP</b>	<b>Ñ Serve</b>		
	1	19,96	18,96	20,96	1			
		19,34	18,37	20,31				
		<b>LL = A.ln(N° de Golpes) + B</b>						
		<b>A</b>	14,96					
		<b>B</b>	78,49					
		<b>Limite de Liquidez (LL)</b>	<b>29,0</b>					
		<b>Limite de Plasticidade (LP)</b>	<b>19,3</b>					
		<b>Índice de Plasticidade (IP)</b>	<b>9,7</b>					

LABORATÓRIO DE SOLOS E ROCHAS								
<b>Solicitante:</b>	Thaynara Lang de Oliveira	<b>Fone:</b>		<b>Data:</b>	25/09/2018			
<b>Descrição:</b>	Solo cal 6%	<b>Estaca:</b>		<b>Reg. N°:</b>				
<b>Trecho:</b>		<b>Prof (m):</b>		<b>Amostra:</b>				
<b>Obs:</b>								
LIMITE DE LIQUIDEZ - NBR-6459								
<b>Determinação</b>	<b>#</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Cápsula</b>	<b>#</b>	1	2	3	4	7		
<b>Massa Solo Úmido + Cápsula</b>	<b>(g)</b>	45,00	45,80	44,00	42,70	51,40		
<b>Massa Solo Seco + Cápsula</b>	<b>(g)</b>	40,00	39,70	38,20	36,20	41,80		
<b>Massa da Cápsula</b>	<b>(g)</b>	17,00	16,80	17,00	16,00	17,00		
<b>Massa da Água</b>	<b>(g)</b>	5,00	6,10	5,80	6,50	9,60		
<b>Massa Solo Seco</b>	<b>(g)</b>	23,00	22,90	21,20	20,20	24,80		
<b>Teor de Umidade</b>	<b>(%)</b>	21,74	26,64	27,36	32,18	38,71		
<b>Número de Golpes</b>	<b>#</b>	37	31	25	19	13		
LIMITE DE PLASTICIDADE - NBR-7180								
<b>Determinação</b>	<b>#</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Cápsula</b>	<b>#</b>	3	4	6	18	24		
<b>Massa Solo Úmido + Cápsula</b>	<b>(g)</b>	9,30	9,25	9,60	9,10	9,70		
<b>Massa Solo Seco + Cápsula</b>	<b>(g)</b>	9,08	9,04	9,40	8,89	9,49		
<b>Massa da Cápsula</b>	<b>(g)</b>	8,05	7,95	8,40	7,85	8,50		
<b>Massa da Água</b>	<b>(g)</b>	0,22	0,21	0,20	0,21	0,21		
<b>Massa Solo Seco</b>	<b>(g)</b>	1,03	1,09	1,00	1,04	0,99		
<b>Teor de Umidade</b>	<b>(%)</b>	21,36	19,27	20,00	20,19	21,21		
	<b>CRITÉRIO DE ACETIÇÃO DA MÉDIA (LP)</b>							
		<b>#</b>	<b>LP</b>	<b>0,95.LP</b>	<b>1,05.LP</b>	<b>Ñ Serve</b>		
	1	20,41	19,39	21,43	1			
		20,69	19,66	21,73				
	<b>LL = A.ln(Nº de Golpes) + B</b>							
	<b>A</b>	15,35						
	<b>B</b>	77,74						
	<b>Limite de Liquidez (LL)</b>	<b>28,0</b>						
	<b>Limite de Plasticidade (LP)</b>	<b>20,7</b>						
	<b>Índice de Plasticidade (IP)</b>	<b>7,3</b>						

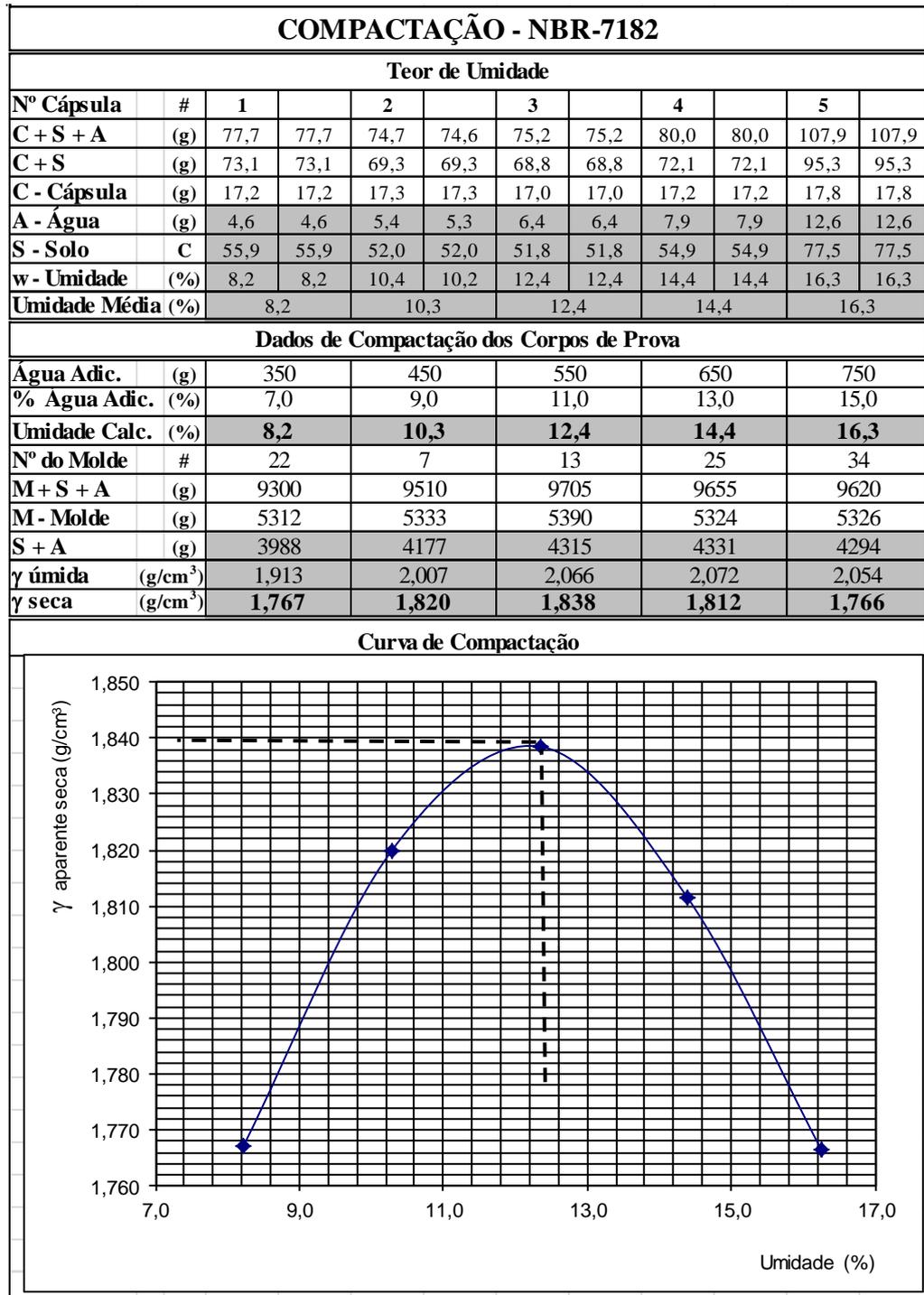
LABORATÓRIO DE SOLOS E ROCHAS																												
<b>Solicitante:</b>	Thaynara Lang de Oliveira	<b>Fone:</b>		<b>Data:</b>	25/09/2018																							
<b>Descrição:</b>	Solo cal 8%	<b>Estaca:</b>		<b>Reg. N°:</b>																								
<b>Trecho:</b>		<b>Prof (m):</b>		<b>Amostra:</b>																								
<b>Obs:</b>																												
LIMITE DE LIQUIDEZ - NBR-6459																												
<b>Determinação</b>	#	1	2	3	4	5	6	7																				
<b>Cápsula</b>	#	1	2	3	4	7																						
<b>Massa Solo Úmido + Cápsula</b>	(g)	44,90	45,40	44,00	42,50	50,20																						
<b>Massa Solo Seco + Cápsula</b>	(g)	40,00	39,70	38,20	36,20	41,80																						
<b>Massa da Cápsula</b>	(g)	16,00	16,80	17,00	16,00	17,00																						
<b>Massa da Água</b>	(g)	4,90	5,70	5,80	6,30	8,40																						
<b>Massa Solo Seco</b>	(g)	24,00	22,90	21,20	20,20	24,80																						
<b>Teor de Umidade</b>	(%)	20,42	24,89	27,36	31,19	33,87																						
<b>Número de Golpes</b>	#	37	31	25	19	13																						
LIMITE DE PLASTICIDADE - NBR-7180																												
<b>Determinação</b>	#	1	2	3	4	5	6	7																				
<b>Cápsula</b>	#	3	4	6	18	24																						
<b>Massa Solo Úmido + Cápsula</b>	(g)	9,30	9,25	9,60	9,10	9,70																						
<b>Massa Solo Seco + Cápsula</b>	(g)	9,08	9,00	9,38	8,89	9,49																						
<b>Massa da Cápsula</b>	(g)	8,05	7,95	8,40	7,85	8,50																						
<b>Massa da Água</b>	(g)	0,22	0,25	0,22	0,21	0,21																						
<b>Massa Solo Seco</b>	(g)	1,03	1,05	0,98	1,04	0,99																						
<b>Teor de Umidade</b>	(%)	21,36	23,81	22,45	20,19	21,21																						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="5">CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DA MÉDIA (<math>\bar{L}_P</math>)</th> </tr> <tr> <th>#</th> <th><math>\bar{L}_P</math></th> <th>0,95.<math>\bar{L}_P</math></th> <th>1,05.<math>\bar{L}_P</math></th> <th>Ñ Serve</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>21,80</td> <td>20,71</td> <td>22,89</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td></td> <td>21,67</td> <td>20,59</td> <td>22,76</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>								CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DA MÉDIA ( $\bar{L}_P$ )					#	$\bar{L}_P$	0,95. $\bar{L}_P$	1,05. $\bar{L}_P$	Ñ Serve	1	21,80	20,71	22,89	2		21,67	20,59	22,76	
	CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DA MÉDIA ( $\bar{L}_P$ )																											
#	$\bar{L}_P$	0,95. $\bar{L}_P$	1,05. $\bar{L}_P$	Ñ Serve																								
1	21,80	20,71	22,89	2																								
	21,67	20,59	22,76																									
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"><math>LL = A \cdot \ln(N^\circ \text{ de Golpes}) + B</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>12,46</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>66,85</td> </tr> </tbody> </table>								$LL = A \cdot \ln(N^\circ \text{ de Golpes}) + B$		A	12,46	B	66,85														
$LL = A \cdot \ln(N^\circ \text{ de Golpes}) + B$																												
A	12,46																											
B	66,85																											
	<b>Limite de Liquidez (LL)</b>		<b>26,0</b>																									
	<b>Limite de Plasticidade (LP)</b>		<b>21,7</b>																									
	<b>Índice de Plasticidade (IP)</b>		<b>4,3</b>																									

- **Compactação**  
Solo cal 4%

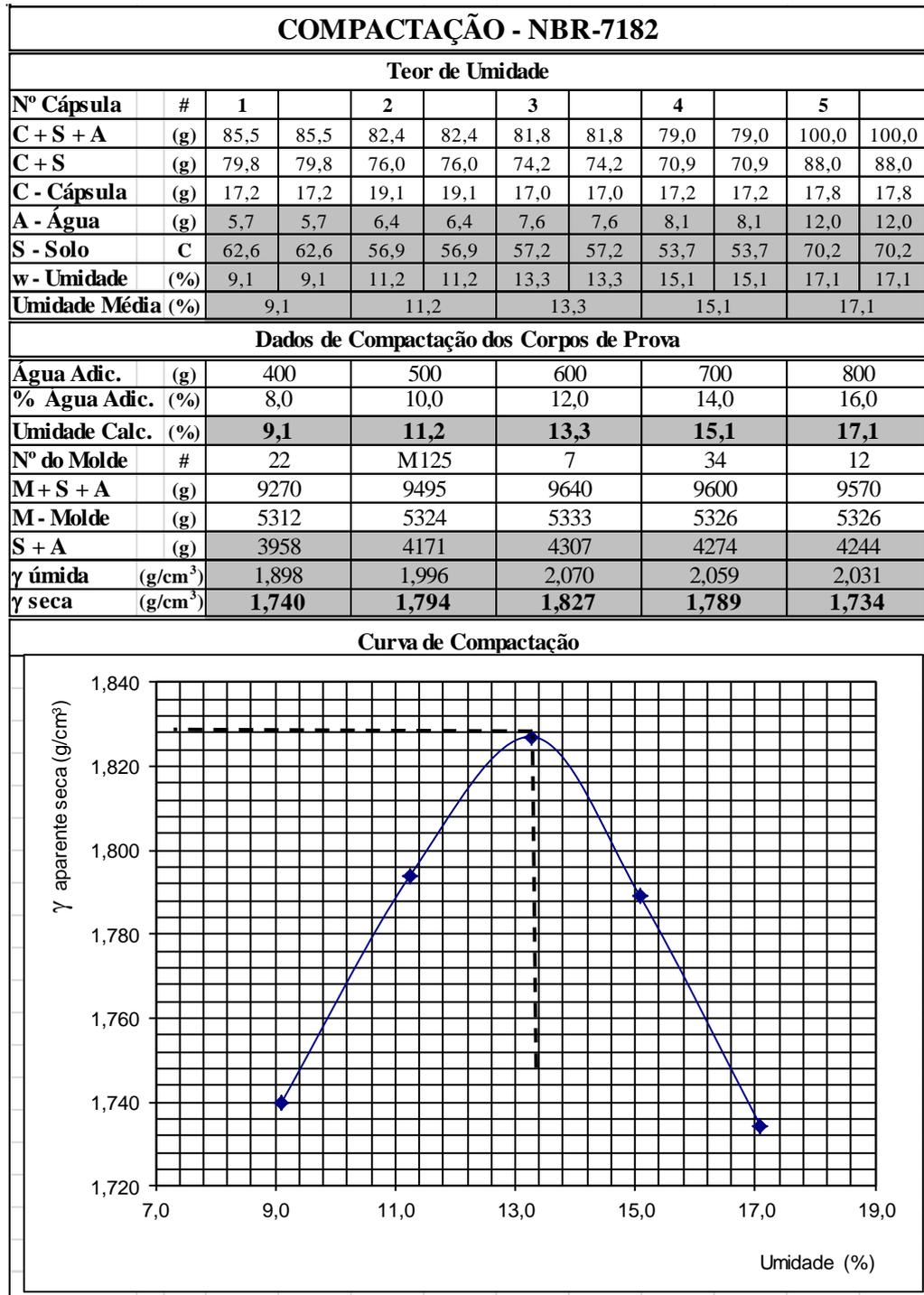


$\gamma_{s,max}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,850
$W_{ótima}$ (%)	12,1

## Solo cal 6%



## Solo cal 8%



$\gamma_{s,max}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,827
$W_{ótima}$ (%)	13,3

- CBR

## Solo cal 4%

## ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

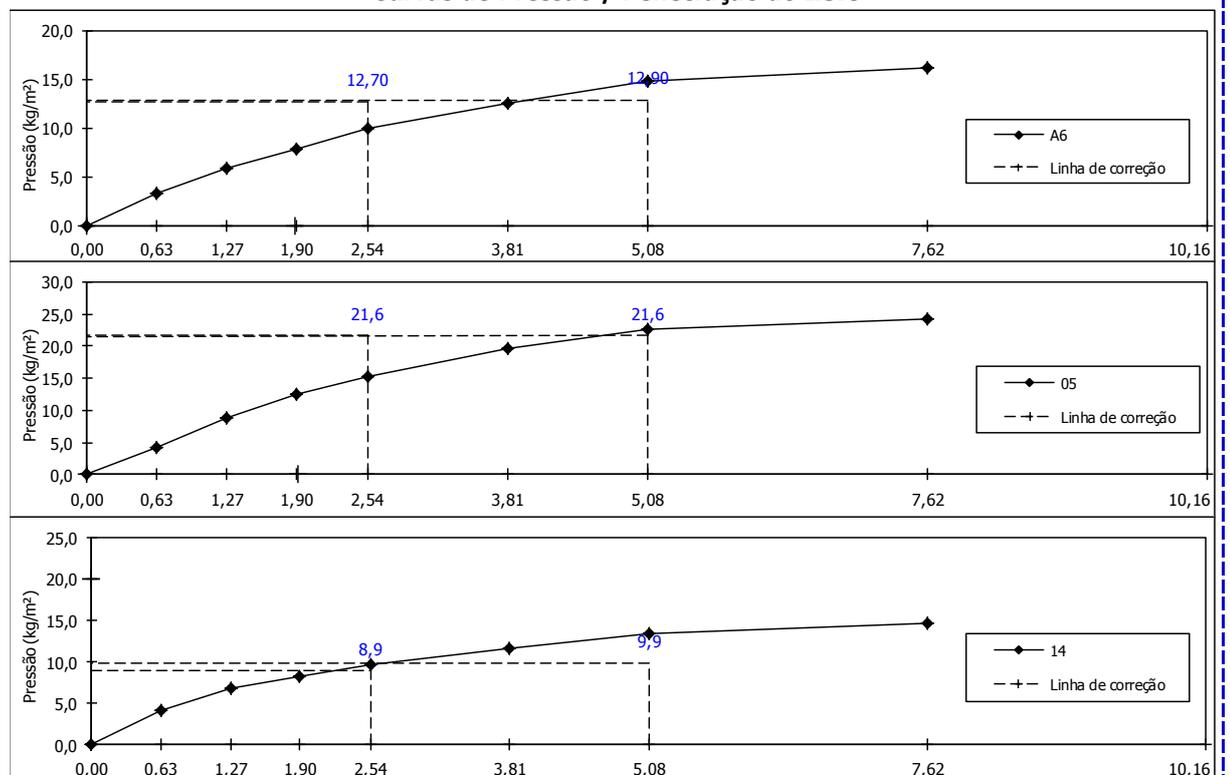
EXPANSÃO											
Molde (Nº)			21			25			13		
Altura do molde (cm)			11,38			11,38			11,38		
-			-			-			-		
Data			Leitura (mm)			Difer. (mm)			Exp. (%)		
27/09/2004	seg	14:00	4,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
28/09/2004	ter	14:00									
29/09/2004	qua	14:00									
30/09/2004	qui	14:00									
01/10/2004	sex	14:00	6,00	2,00	<b>1,76</b>	2,80	0,80	<b>0,70</b>	1,50	0,50	<b>0,44</b>
Cil.+am. após embebição											
Peso da água absorvida											

Anel dinamométrico
DIN 001
Constante do anel
0,10485
Relógio comparador
EXT 001
Área do pistão (cm²)
19,3221

## PENETRAÇÃO

Tempo	Penetração		Pressão Padrão	Molde A6				Molde 05				Molde 14			
	mm	Pol.		Leitura	Pressão Kg/m²	ISC	Leitura	Pressão Kg/m²	ISC	Leitura	Pressão Kg/m²	ISC			
Min.	mm	Pol.	mm	Calcul.	Corrig.	%	mm	Calcul.	Corrig.	%	mm	Calcul.	Corrig.	%	
0,5	0,63	0,025	-	32	3,36			41	4,3			40	4,2		
1,0	1,27	0,050	-	56	5,87			84	8,8			65	6,8		
1,5	1,90	0,075	-	75	7,86			118	12,4			78	8,2		
2,0	2,54	0,100	70,31	95	9,96	10,0	<b>14,2</b>	145	15,2	15,2	<b>21,6</b>	92	9,6	9,6	<b>13,7</b>
3,0	3,81	0,150	-	120	12,58			186	19,5			110	11,5		
4,0	5,08	0,200	105,46	142	14,89	14,9	<b>14,1</b>	215	22,5	22,5	<b>21,4</b>	128	13,4	13,4	<b>12,7</b>
6,0	7,62	0,300	-	155	16,25			230	24,1			140	14,7		
8,0	10,16	0,400	-												
10,0	12,70	0,500	-												

## Curvas de Pressão / Penetração do I.S.C



## Solo cal 6%

## ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

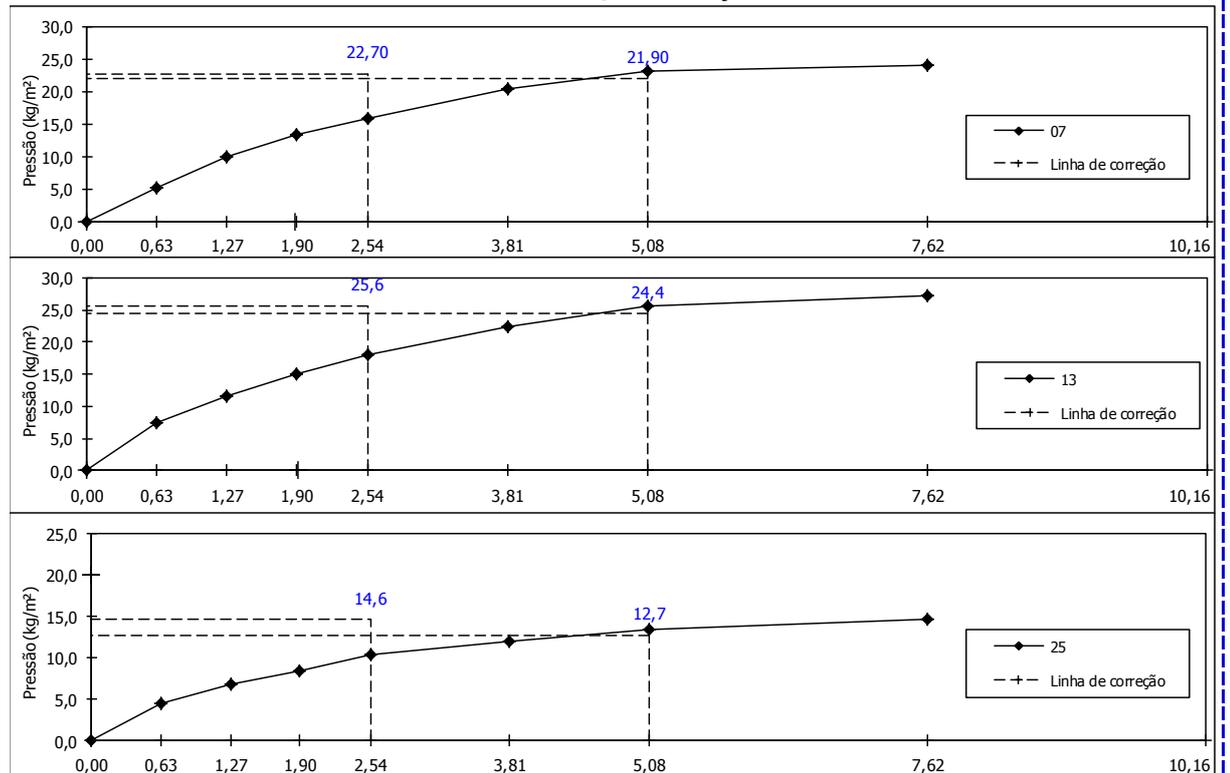
EXPANSÃO											
Molde (Nº)		07			13			25			
Altura do molde (cm)		11,38			11,38			11,38			
-		-			-			-			
Data	Hora	Leitura (mm)	Difer. (mm)	Exp. (%)	Leitura (mm)	Difer. (mm)	Exp. (%)	Leitura (mm)	Difer. (mm)	Exp. (%)	
27/09/2004	seg 14:00	4,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	
28/09/2004	ter 14:00										
29/09/2004	qua 14:00										
30/09/2004	qui 14:00										
01/10/2004	sex 14:00	5,50	1,50	<b>1,32</b>	2,70	0,70	<b>0,62</b>	1,20	0,20	<b>0,18</b>	
Cil. + am. após embebição											
Peso da água absorvida											

Anel dinamométrico
DIN 001
Constante do anel
0,10485
Relógio comparador
EXT 001
Área do pistão (cm²)
19,3221

## PENETRAÇÃO

Tempo Min.	Penetração		Pressão Padrão	Molde 07			Molde 13			Molde 25		
	mm	Pol.		Leitura mm	Pressão Kg/m² Calcul.	ISC Corrig.	Leitura mm	Pressão Kg/m² Calcul.	ISC Corrig.	Leitura mm	Pressão Kg/m² Calcul.	ISC Corrig.
0,5	0,63	0,025	-	50	5,24		70	7,3		42	4,4	
1,0	1,27	0,050	-	95	9,96		110	11,5		65	6,8	
1,5	1,90	0,075	-	128	13,42		143	15,0		80	8,4	
2,0	2,54	0,100	70,31	152	15,94	15,9	172	18,0	18,0	98	10,3	10,3
3,0	3,81	0,150	-	195	20,45		213	22,3		114	12,0	
4,0	5,08	0,200	105,46	220	23,07	23,1	245	25,7	25,7	128	13,4	13,4
6,0	7,62	0,300	-	230	24,12		260	27,3		140	14,7	
8,0	10,16	0,400	-									
10,0	12,70	0,500	-									

## Curvas de Pressão / Penetração do I.S.C



## Solo cal 8%

## ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

EXPANSÃO											
Molde (Nº)			M25			07			34		
Altura do molde (cm)			11,38			11,38			11,38		
Data	Hora		Leitura (mm)	Difer. (mm)	Exp. (%)	Leitura (mm)	Difer. (mm)	Exp. (%)	Leitura (mm)	Difer. (mm)	Exp. (%)
27/09/2004	seg	14:00	4,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
28/09/2004	ter	14:00									
29/09/2004	qua	14:00									
30/09/2004	qui	14:00									
01/10/2004	sex	14:00	4,90	0,90	<b>0,79</b>	2,60	0,60	<b>0,53</b>	1,15	0,15	<b>0,13</b>
Cl.+am. após embebição											
Peso da água absorvida											

Anel dinamométrico
DIN 001
Constante do anel
0,10485
Relógio comparador
EXT 001
Área do pistão (cm <sup>2</sup> )
19,3221

## PENETRAÇÃO

Tempo Min.	Penetração		Pressão Padrão	Molde M25				Molde 07				Molde 34			
	mm	Pol.		Leitura mm	Pressão Kg/m <sup>2</sup> Calcul.	ISC Corrig.	%	Leitura mm	Pressão Kg/m <sup>2</sup> Calcul.	ISC Corrig.	%	Leitura mm	Pressão Kg/m <sup>2</sup> Calcul.	ISC Corrig.	%
0,5	0,63	0,025	-	65	6,82			60	6,3			40	4,2		
1,0	1,27	0,050	-	108	11,32			120	12,6			72	7,5		
1,5	1,90	0,075	-	145	15,20			170	17,8			96	10,1		
2,0	2,54	0,100	70,31	166	17,41	17,4	<b>24,8</b>	220	23,1	23,1	<b>32,8</b>	118	12,4	12,4	<b>17,6</b>
3,0	3,81	0,150	-	192	20,13			275	28,8			156	16,4		
4,0	5,08	0,200	105,46	212	22,23	22,2	<b>21,1</b>	300	31,5	31,5	<b>29,8</b>	183	19,2	19,2	<b>18,2</b>
6,0	7,62	0,300	-	226	23,70			316	33,1			205	21,5		
8,0	10,16	0,400	-												
10,0	12,70	0,500	-												

## Curvas de Pressão / Penetração do I.S.C

