

**JOÃO LUCAS PEREIRA CORREIA DE MIRANDA**  
**NAÍS CRISTINA SILVA ARANTES**

**ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS COM**  
**ADIÇÃO DE CAL PARA PAVIMENTAÇÃO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

**ORIENTADOR: RODOLFO RODRIGUES DE SOUSA**  
**BORGES**

**ANÁPOLIS / GO: 2019**

## FICHA CATALOGRÁFICA

MIRANDA, JOÃO LUCAS /ARANTES, NAÍS CRISTINA.

Estudo de estabilização química de solos com adição de cal para pavimentação

55P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2019).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

- |                          |                                 |
|--------------------------|---------------------------------|
| 1. Estabilização química | 2. Solo                         |
| 3. Cal                   | 4. Pavimentação                 |
| I. UNIEVANGELICA         | II. Bacharel (10 <sup>o</sup> ) |

### REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MIRANDA, João Lucas; ARANTES, Naís Cristina Estudo de estabilização química de solos com adição de cal para pavimentação. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 55P. 2019.

### CESSÃO DE DIREITOS

João Lucas Pereira Correia de Miranda

Naís Cristina Silva Arantes

ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS ATRAVÉS DE CAL PARA PAVIMENTAÇÃO

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2019

É concedida à UniEvangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

João Lucas Pereira C. de Miranda

João Lucas Pereira C. de Miranda  
Joalucas.engcivil@gmail.com

Naís Cristina S. Arantes

Naís Cristina Arantes Silva  
Naisarantes2@gmail.com

**JOÃO LUCAS PEREIRA CORREIA DE MIRANDA**

**NAÍS CRISTINA SILVA ARANTES**

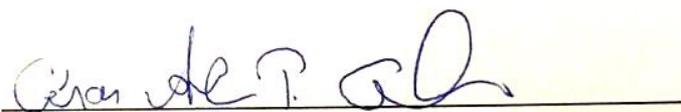
**ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS COM  
ADIÇÃO DE CAL PARA PAVIMENTAÇÃO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE  
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

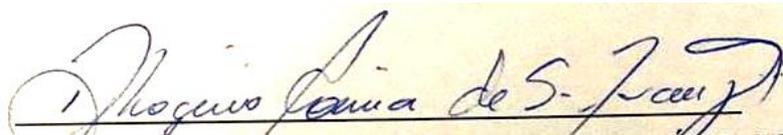
**APROVADO POR:**



**RODOLFO RODRIGUES DE SOUSA BORGES (UniEvangélica)  
(ORIENTADOR)**



**CÉSAR AUGUSTO PAIVA GOLÇALVES, Mester (UniEvangélica)  
(EXAMINADOR INTERNO)**



**RHOGÉRIO CORREIA DE SOUZA ARAÚJO, Mestre (UniEvangélica)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ANÁPOLIS/GO, 27 maio de 2019**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus que possibilitou o meu egresso na universidade e minha caminhada até chegar aqui, abençoando minhas conquistas, agradeço também a minha família que sempre me apoiou em minhas decisões.

João Lucas Pereira Correia de Miranda

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus pois sem ele eu não teria forças para essa longa jornada, que me guiou, orientou, capacitou e tornou possível a realização deste sonho.

Aos meus pais Milton e Sinete que são meus maiores exemplos, sei que foram várias as dificuldades passadas, noites sem dormir, além de muitas horas de trabalho e preocupações, paciência, risadas, conversas, decepções. Agradecer todo o carinho, amor e dedicação, por ter me ensinado os valores e os princípios fundamentais para minha vida, espero agora, com esta conquista, poder ajudar e mostrar o quanto são importantes para mim.

Agradeço meu noivo Cristiano pela companhia, paciência, incentivos. Sempre me apoiou, ajudando-me a superar cada obstáculo.

As amigadas cultivadas em Anapolis-Go, que direta ou indiretamente fizeram a diferença em minha vida.

Todos os professores da Faculdade Unievangelica pelo conhecimento adquirido, em especial ao meu orientado Rodolfo, pelo profissionalismo, dedicação e disponibilidade.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste sonho, minha sincera gratidão.

Naís Cristina Silva Arantes

## **RESUMO**

O solo é um material físico utilizado em obras, e se constrói qualquer infra- estrutura, e possui uma grande variação nas suas propriedades físicas. Pode ser usado em obras de pavimentação, quando o solo não atende as especificações necessárias para o uso, existe algumas técnicas que são capazes de melhorar o solo, fazendo que fique mais apropriado para ser utilizado em pavimentação, por exemplo: a adição de cal, para o solo ficar com características melhores, como resistência á deformação. O solo compreende duas ou mais camadas que são chamadas horizontes, uma em baixo da outra, cada uma semelhante a superfície do terreno. Sera realizado o estudo de casos do solo da Unievangélica do campus de Anápolis-go a fins de pavimentar o solo com adição de cal.

A cal é um ótimo reagente para fins de estabilização, que torna o solo impermeável e aplicável para uso em bases de pavimentos urbanos e rodoviários, melhorando assim a relação custo x benefício, e também para ter capacidade de resistir a carregamentos.

### **PALAVRAS-CHAVE:**

Estabilização de solo, estabilização química, solo-cal, pavimentação asfáltica.

## **ABSTRACT**

Soil is a health material used in works, and if it builds infrastructures, and that has a great variety in its physical properties. Can be used in paving works, when the soil is not subject to specifications required for use, there are some techniques that are able to improve the soil, making it more suitable to be used in paving, for example: a So for the ground stay with the best characteristics, such as deformation force. The soil targets two or more times are called horizons, one under the other, each similar to a surface of the terrain. The case study of the soil of the Unievangélica of the campus of Anápolis-Go will be carried out in order to pave the soil with the addition of lime for paving.

In order to become a good reagent to stabilize living standards and mobility, improve the cost-benefit ratio, take better advantage of the benefits and confer greater capacity of resistance loads.

### **KEY WORDS:**

Soil stabilization, chemical stabilization, soil-lime, asphalt paving.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fatores que influenciam as reações cal-solo .....	22
Figura 2 – Sistema de pavimentação .....	27
Figura 3 – Revestimento asfáltico .....	29
Figura 4 – Pavimento rodoviário .....	30
Figura 5 – Representação da resistência ao deslizamento .....	32
Figura 6 – Atrito entre dois corpos no instante do deslizamento .....	33
Figura 7 – Resistência ao cisalhamento devido à coesão.....	33
Figura 8 – Representação do critério de coulomb .....	35
Figura 9 – Representação do critério de ruptura de Mohr .....	35
Figura 10 – Faculdade Univangélica .....	37
Figura 11 – Solo espalhado no chão .....	38
Figura 12 – Local onde solo foi retirado .....	38
Figura 13 – Ensaio de granulometria .....	39
Figura 14 – Recipiente com solo .....	40
Figura 15 – Solo em capsula para fazer o ensaio de umidade .....	40
Figura 16 – Solo fazer a compactação .....	40
Figura 17 – corpo de prova submerso na água .....	42
Figura 18 – Solo da unievangelica .....	43
Figura 19 – Cal utilizada .....	44
Figura 20 – Água .....	45
Figura 21 – Balança de precisão .....	46
Figura 22 – Peneira utilizada .....	46
Figura 23 – Molde.....	47
Figura 24 – Equipamento de proctor .....	47
Figura 25 – Gráfico de densidade da amostra .....	48
Figura 26 – Gráfico de expansão da amostra .....	50
Figura 27 – Gráfico do CBR da amostra.....	50

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Exigências químicas e físicas para cal virgem.....	20
Tabela 2 - Exigências químicas e físicas para cal virgem hidratada .....	21
Tabela 3 - Composição do perfil da “Via Ápia” .....	23
Tabela 4 - Classificação dos solos segundo o Sistema Rodoviário .....	29
Tabela 5 - Propriedades do solo-cimento para compor uma base rodoviária .....	31
Tabela 6 - Características da amostra natural .....	47
Tabela 7 - Características da amostra com 2% de cal .....	49
Tabela 8 - Características da amostra com 3% de cal.....	50
Tabela 9 - Características da amostra com 4% de cal.....	51
Tabela 10 - Características da amostra com 5% de cal.....	52

## **LISTA DE ABREVIATURA E SIGLA**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBR	Capacidade de Suporte Califórnia
CNT	Confederação nacional de transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
IFG	Instituto Federal de Goiás
IPT	Instituto de pesquisas tecnológicas
NBR	Norma Brasileira

## LISTA DE SIMBOLOS

$\tau$	Resistência ao cisalhamento do solo
$\sigma$	Tensão normal
$\varphi$	Ângulo de atrito interno do solo

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	15
<b>1.2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>15</b>
1.3 METODOLOGIA.....	15
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 SOLO.....	17
<b>2.1.1 Definição De Solos .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.2 Classificação dos Solos .....</b>	<b>18</b>
2.2 CAL.....	19
<b>2.2.1 Classificação Da Cal.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.2 Técnica Solo-Cal.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.3 Fatores que influenciam as reações Cal-Solo.....</b>	<b>22</b>
2.4 ÁGUA.....	23
2.5 BREVE HISTORICO.....	23
2.6 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	24
2.7 MÉTODOS DE ESTABILIZAÇÃO.....	24
2.8 ESTABILIZAÇÕES QUÍMICA.....	24
2.9 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS ATRAVÉS DA CAL.....	25
<b>2.8.1 Vantagens: .....</b>	<b>25</b>
<b>2.8.2 Desvantagens: .....</b>	<b>25</b>
2.9 MELHORIAS NA ADIÇÃO DA CAL NA PAVIMENTAÇÃO.....	26
2.10 ESTABILIZAÇÃO DE SOLO PARA PAVIMENTAÇÃO.....	26
2.10 PAVIMENTAÇÃO.....	27
<b>2.11.1 Classificações dos Pavimentos.....</b>	<b>28</b>
<b>2.11.2 Pavimentos Flexíveis .....</b>	<b>28</b>
<b>2.10.1 Pavimentos Rígidos .....</b>	<b>28</b>
<b>2.10.2 Pavimentos Semi-Rígidos .....</b>	<b>29</b>
<b>2.10.3 Classificação de solo pelo Sistema Rodoviário.....</b>	<b>29</b>
<b>2.10.4 Pavimento Rodoviário .....</b>	<b>30</b>
2.11 SUBLEITO.....	31
<b>2.11.1 Reforços Do Subleito .....</b>	<b>31</b>
<b>2.11.2 Sub-Base .....</b>	<b>31</b>

<b>2.11.3 BASE.....</b>	<b>32</b>
<b>2.11.4 Revestimento .....</b>	<b>32</b>
2.12 RESISTÊNCIA DO SOLO AO CISALHAMENTO .....	32
<b>2.12.2 Atrito.....</b>	<b>32</b>
<b>2.12.2 Coesão.....</b>	<b>34</b>
<b>2.12.3 Resistência De Solos .....</b>	<b>34</b>
<b>2.12.4 Critérios de Ruptura .....</b>	<b>35</b>
<b>2.12.5 Critério De Mohr.....</b>	<b>35</b>
2.13 NORMAS E PROCEDIMENTOS.....	36
<b>3 ESTUDO DE CASOS .....</b>	<b>37</b>
3.1 CLASSIFICACAO DO ESTUDO .....	37
3.2 PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS .....	37
3.3 LOCAL DA AMOSTRA COLETADA.....	37
3.4 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS E DESCRIÇÃO DE EQUIPAMENTOS.....	39
3.5 MATERIAIS UTILIZADO NA PESQUISA .....	42
<b>3.5.1 Solo .....</b>	<b>42</b>
<b>3.5.2 Cal .....</b>	<b>43</b>
<b>3.5.3 Água .....</b>	<b>44</b>
<b>3.5.4 Balança .....</b>	<b>44</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANALISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
4.1 AMOSTRA NATURAL DO SOLO .....	49
4.2 AMOSTRA DO SOLO COM 2% CAL .....	49
4.3 AMOSTRA DO SOLO COM 3% CAL.....	50
4.4 AMOSTRA DO SOLO COM 4% CAL.....	51
4.5 AMOSTRA DO SOLO COM 5% CAL.....	51
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A ABNT (NBR 6502) define solo como “Material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica”, ou simplesmente, produto da decomposição e desintegração da rocha pela ação de agentes atmosféricos.

Entretanto, para uma determinada obra o solo existente pode ou não atender as características para seu uso, em seu estado natural. Quando se depara com essa situação a solução é a remoção do mesmo e substituí-lo por outro que atenda as exigências, ou pode-se, corrigi-lo por processos de modificação, como a estabilização granulométrica, ou pela adição de aditivos químicos que melhoram as características físicas e mecânicas do mesmo para seu aproveitamento. Em busca de melhorias com custo reduzido, que visem a sustentabilidade, a estabilização de solos surge como uma boa opção em contrapartida ao emprego de britas, cujo uso é tradicional na área da pavimentação.

O emprego da cal como aditivo para estabilização de um solo é uma das mais antigas técnicas utilizadas pelo homem para melhorar as características físicas e mecânicas do mesmo. Há exemplos dessa utilização na via Àpia (sul da Itália), construída em 312 a.C. e em trechos da Muralha da China, datado de 2280 a.C. (GUIMARÃES, 1998).

Partindo deste pretexto, o intuito do trabalho é como deixar o solo adequado para pavimentação asfáltica, devido ao nosso território ser extenso e possuir solos diferentes em cada região, e que alguns sofrem influenciam dos fatores de formação, e dependendo de sua finalidade não há necessidade de modificar, em outros casos é preciso devido a sua baixa resitencia.

Será feito um estudo do solo da Unievangelica misturando aditivos para sua melhoria e fim de pavimenta-lo. Feremos uma análise do solo e estudaremos dosagens para que chegássemos a uma quantidade ideal de aditivo para que tenha resistência, e que tenham valores mínimos exigidos pelas normas.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Devido à diversidade do solo brasileiro, foi observado que umas das problemáticas envolvidas é a baixa resistência dos solos que dificultam a implantação da pavimentação, uma das maneiras de resolver esse problema e com a utilização de estabilização de solos do modo solo-cal.

Os solos e lateritas são considerados pela engenharia como materiais de construção e de sustentação das obras. Em rodovias, estes compõem as camadas estruturais do pavimento (subleito, sub-base, base, capa asfáltica). Para tanto, devem apresentar certas propriedades, para que sejam capazes de conferir estabilidade e resistência mecânica aos esforços e cargas a que serão submetidos durante a vida útil da estrada. (AZEVEDO et al., 1998, p. 01 ).

Segundo a (VOLVO 2018), a cal é uma ótima opção para alterar as propriedades físicas e mecânicas do solo em curto prazo, a estabilização do solo ocorre quando a cal é adicionada a um solo e gera uma resistência por meio de reações pozolânicas que ocorrem por um período longo enquanto houver cal suficiente e o pH permaneça elevado. Em contraste com a modificação, a estabilização proporciona benefícios estruturais e pode ser empregada para a melhoria do subleito, assim como na execução de sub-bases e base. Iremos analisar o solo da Unievangelica da terceira saída da faculdade a fins de pavimentação iremos sugerir uma dosagem fazer testes laboratoriais e verificar seus benefícios e tentar fazer com que atinja as normas no DNIT, que é um CBR de 80%, com intuito de receber cargas de veículos, e apresentar os dados para uma possível melhoria.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

A pesquisa teve como objetivo geral averiguar o solo da Unievangélica no campus de Anápolis-GO, fazer uma estabilização utilizando a técnica solo-cal com intuito de ganhar resistência com finalidade de pavimentação.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Classificar o tipo de solo da Unievangélica no campus de Anápolis-GO, onde será coletado o material;
- Fazer testes laboratoriais do solo;

- Proporcionar uma mistura que atenda as especificações normativas;
- Identificar e sugerir uma dosagem para a estabilização do solo com a cal.

### 1.3 METODOLOGIA

Propondo se explicar a razão pela qual optamos por esse método de estabilização do solo que faremos no campus da Unievangélica em Anápolis-GO a fim de pavimentá-lo, este trabalho visa experimentos através de testes laboratoriais para comprovar o aumento de resistência adquirido quando adicionamos a cal.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Cap. 1 – Introdução: Constituído pela introdução em que é apresentada a problemática e a relevância da pesquisa realizada, objetivo geral e objetivos específicos.

Cap. 2 – Revisão Bibliográfica: Aborda os aspectos relevantes para execução deste trabalho. Está subdividida em: solos; estabilização química; parâmetros influenciadores do comportamento mecânico; tecnologias e aplicabilidade.

Cap. 3 – Estudo de caso: Realizar a coleta do solo da terceira saída da Unievangélica, analisar o solo, fazer testes laboratoriais, e mostrar os materiais utilizados.

Cap. 4 – Apresentação e análise dos resultados: resultados feitos no laboratório ENGETEC- Anápolis, para verificar seu CBR e verificar se os testes serão eficientes para pavimentação, e sugerir e apresentar algumas dosagens.

Cap. 5 – Conclusão: Os resultados dos ensaios realizados e conclusão e visar seu custo benefício, e vê se o estudo foi satisfatório para nosso estudo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 SOLO

O solo é a base de qualquer construção, na óptica de um engenheiro civil, com finalidade de suportar as suas construções e dar sustentação, e também determina características fundamentais do projeto, explícitas em pavimentações. É um dos materiais mais antigos usados na construção civil, que esta presente na maioria das obras de engenharia, por isso é necessário o conhecimento de suas propriedades, para estudar seu comportamento.

Para Caputo (1983, pg.14), “são materiais que resultam do intemperismo ou meteorização das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química.” Para Lepsch (1972, p.336) define o solo como um corpo natural, no formato de horizontes (camada paralelas a superfície) e constituído de elementos minerais ou orgânicos.

O solo é um material físico utilizado em obras, e se constrói qualquer infra- estrutura, e que possui uma grande variação nas suas propriedades físicas. Pode ser usado em obras de pavimentação, quando o solo não atende as especificações necessárias para o uso, existe algumas técnicas que são capazes de melhorar o solo, fazendo que fique mais apropriado para ser utilizado em pavimentação, por exemplo: a adição de cal, Assim para o solo ficar com características melhores, como resistência á deformação.

Na área da construção civil, a engenharia geotécnica é imprescindível para a realização de projetos, sendo o solo seu principal objeto de estudo, um material complexo e variável, de difícil previsão de comportamento e que em muitas vezes não pode ser adequadamente empregado em sua forma natural (GUIMARÃES, 1998).

#### 2.1.1 Definição De Solos

O solo compreende duas ou mais camadas que são chamadas horizontes, uma embaixo da outra, cada uma semelhante a superfície do terreno. As Características para diferenciarmos os horizontes são:

- Tonalidade, textura, estrutura, aparência, consistência, permeabilidade, porosidade e reações do solo;
- Tamanhos que variam de metros de profundidade a somente centímetros;

A primeira característica que distingue os solos é 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 e formam uma pasta quando molhadas (PINTO, 2006).

O solo é composto por partículas de matérias (mineral e orgânica): mineral (areia, calcário, silte, argila), orgânica (restos de plantas e animais, húmus), além de água, ar e vazios.

Essas partículas e as forças aplicadas sobre elas são transmitidas umas as outras. Nas partículas maiores a transmissão se dá pelo contato direto. Já nas partículas menores, a transmissão ocorre através da água absorvida.

### **2.1.2 Classificação dos Solos**

Em geral os solos classificam-se em três grupos:

#### **2.1.2.1 Solos Coesivos:**

São os solos com grãos muito finos, imperceptíveis a olho nu, que aglomeram facilmente um ao outro por serem farináceos. Onde os espaços vazios dessas partículas são muito pequenos, de fácil aderência por causa da sua formação apresentam resistência a penetração de água e por ser fino absorve muito lentamente, uma vez absorvida no solo, encontra complicação para ser retirada do mesmo, tornando se plásticos, propiciando assim o surgimento da lama, apresenta uma boa estabilidade. Quando secos devido as forças naturais (coesão), existentes entre pequenas partículas que compõem esse solo, não é ideal a compactação por vibração devido às partículas se agruparem facilmente, dificultando uma distribuição natural e individualmente entre elas. Esses solos são conhecidos como solos argilosos.

#### **2.1.2.2 Solos Não Coesivos**

Conhecido como glandulares, que são compostos de pedregulhos, pedras, cascalhos, diferente dos solos coesivos, são as partículas grossas (grandes), com um grande intervalo de índices de vazios, no estado seco tem dificuldade para aderência, pois elas não misturam apenas se apoiam uma nas outras.

De acordo com Das (2007, pg.64) solos com estruturas com grãos isolados, as partículas estão dispostas em posições estáveis, com cada partícula em contato com sua adjacente, sendo que a forma e distribuição do tamanho destas e suas posições relativas

influenciam diretamente sobre a densidade do agrupamento, desta maneira, é possível então ter um grande intervalo de índice de vazios.

São altamente permeáveis devido a existênciade espaços vazios grandes entre si, esse solo é fácil de reconhecer devido aos tamanhos dos grãos. Para aguentar as cargas depende da resistência ao deslocamento, porque o movimento entre as partículas são individuais, devido ao número de grãos por unidade de volume e esses solos através de compactação aumentam a resistência entre as partículas e melhoram a transmissão de força entre as mesmas.

### **2.1.2.3 Solos Mistos**

Na natureza o solo mais fácil de encontrar são os mistos, por terem uma porcentagem maior são uma mistura de solos coesivos, com os não coesivos, grãos pequenos, misturados com os grãos grande e com boa aderência nos grãos finos para preencher os espaços vazios os grãos grossos, e são mais suscetíveis a compactação, tem características lisas e redondas e possuem uma grande capacidade de carga.

## **2.2 CAL**

Segundo Marques (2006), a cal virgem ou hidratada é um aglomerante resultante da calcinação de rochas calcárias (calcários ou dolomitos), a uma temperatura inferior à do início de fusão do material.

A cal é um elemento muito utilizado na construção civil. Chamado também de cal viva, cal virgem ou óxido de cálcio, à fórmula da substância química é  $\text{CaO}$ . É composto por oxido de cálcio, sua formação se dá através do aquecimento de pedras calcárias a temperaturas de 1000 graus celsius. A cal tem cor branca e vem sempre em formato de areia ou pedra. É alcançada pela composição térmica de calcário. É uma partículamineral proveniente de rochas calcárias ou magnesianas. A cal é um dos primeiros aglomerantes usados pelo homem na construção civil, até ser inventado o cimento portland, a cal era a principal ligante. Hoje ela continua sendo destaque na construção, é usada, por exemplo no revestimento de paredes, concretos asfálticos, em pinturas e solos estabilizados e também na fabricação de isolantes térmicos e blocos sílico-calcários

A cal é um ótimo reagente para fins de estabilização, que torna o solo impermeável e aplicável para uso em bases de pavimentos urbanos e rodoviários, melhorando assim a relação

custo x benefício, que visa aproveitar o solo e conferir-lhe maior capacidade de resistir a carregamentos.

Do ponto de vista técnico, a cal pode proporcionar às argamassas qualidade de desempenho com relação à função de aglomerante, à melhora na trabalhabilidade, ao aumento da resistência à penetração e à capacidade de retenção de água, além da contribuição na questão da deformabilidade e da resistência (GUIMARÃES, 1998).

## 2.2.1 Classificação Da Cal

A formação da cal virgem é desigual da hidratada, sendo que na virgem há maior presença de magnésio e cálcio. Na hidratada permanecem os hidróxidos de cálcio e magnésio, além de ter pequenos teores de óxidos não hidratados.

### 2.2.1.1 Cal Virgem

A cal virgem, também chamada de cal viva, é feita por meio da decomposição térmica do calcário, da extração e da calcinação do minério. Ela está dividida em três tipos, conforme a ABNT NBR 6.453/2003, mostrado na tabela 1:

**Tabela 1-** Exigências químicas e físicas para cal virgem

Parâmetros para cal virgem (cv)		Limites, por tipo de cal		
		CV-E (1)	CV-C(2)	CV-P(3)
Parâmetros químicos				
Anidrido carbonico (CO <sub>2</sub> )	Fabrica	< 6%	< 12%	≤12%
	Deposito ou obra	< 8%	< 15%	≤15%
Oxidos totais na base de nao-voláteis (CaO <sub>total</sub> +MgO <sub>total</sub> )		≥90%	≥88%	≥88%
Água combinada	Fabrica	≤3,0%	≤3,5	≤3,0%
	Deposito ou obra	≤3,6%	≤4,0%	≤3,6%
Parâmetros físicos				
Finura (%retida acumulada)	Peneira 1,00 mm	≤ 2%	≤ 5%	≥ 85%
	Peneira 0,30 mm	≤15%	≤ 30%	-
CV-E: cal virgem especial CV-C: cal virgem comum CV-P: cal virgem em pedra				

Fonte: NBR 6453\03

### 2.2.1.2 Cal hidratada

Cal hidratada é classificada em 3 tipos, de acordo com a ABNT NBR 7175\03, mostrado na tabela 2 a cal hidratada tem propriedades químicas e físicas diferenciadas.

“Por exemplo, a CH I exige limite de óxidos totais (cálcio somado ao magnésio, responsáveis pela capacidade ligante do material), enquanto a CH III suporta um limite maior de material carbonático residual (fração da matéria-prima original tipicamente presente em função do processo de fabricação), de acordo com (IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas).”

**Tabela 2-** Exigências químicas e físicas para cal virgem hidratada

Parametros para cal hidratada (CH)		Limites, por tipo de cal		
		CV-I (1)	CV-II(2)	CV-III(3)
Parametros quimicos				
Anidrido carbonico (CO <sub>2</sub> )	Fabrica	≥ 5%	≤ 5%	≤13%
	Deposito ou obra	≤ 7%	≤7%	≤15%
Oxidos de calcio e magnesio não hidratado calculado (CaO+MgO)		≤10%	≤15%	≤15%
Oxidos totais na base de nao-voláteis (CaOtotal+MgOtotal)		≥90%	≥88%	≥88%
Parâmetros físicos				
Finura (%retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5%	≤0,5%	≥ 0,5%
	Peneira 0,0750 mm	≤10%	≤ 15%	≤15%
Retenção de agua		≥75%	≥75%	≥70%
Incorporacao de areia		≥3,0	≥2,5	≥2,2
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Platicidade		≥ 110	≥110	≥110
CV-I: cal hidratada tipo I CV-II: cal hidratada tipo II CV-III: cal hidratada tipo III				

Fonte: NBR 7175\03

A cal virgem é a matéria-prima que é utilizada para a confecção da cal hidratada, a principal diferença entre utilizar a cal virgem ou a cal hidratada está no processo de hidratação. O custo menor da cal virgem não supre o custo da mão de obra pois existem varios riscos envolvidos como: de acidentes com queimaduras decorrentes dos processos de extinção e envelhecimento da pasta, além da hidratada reduzir o tempo de andamento da obra, porque a mesma pode ser utilizada logo depois do o preparo da argamassa.

### 2.2.2 Técnica Solo-Cal

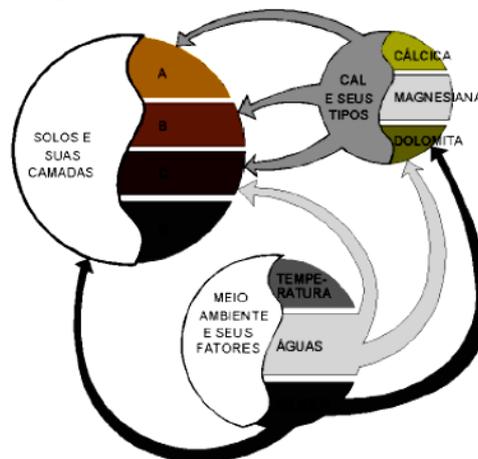
Quando um solo não tem as propriedades geotécnicas exigidas para sustentar a obra projetada, principalmente quando se fala de resistência, torna-se necessário fazer uma modificação para melhorá-lo, modificando suas propriedades para criar um material que atenda as necessidades da construção desejada para estabilizar o solo, com a adição de agentes químicos, como a cal. A estabilização química com cal é uma mistura de solo, cal e água em quantidade determinadas por ensaios laboratoriais, para melhorar as propriedades dos solos. Solo-cal é uma reação química e física que ocorre para a estabilização ou modificação do solo.

Segundo (little, 1999). “a modificação do solo ocorre devido à troca de cátions de cálcio, fornecidos pelo hidróxido de cálcio  $Ca(OH)_2$ , por cátions que estão presentes no solo argilo-mineral, incitadas por um ambiente de pH elevado e promovido pelo sistema cal-água. Esse processo é conhecido como troca catiônica e é parcialmente responsável pela mudança da consistência do solo, causada pela floculação de partículas de argila. estas reações químicas dependem de ambientes com pH elevado e da reatividade do solo, ademais elas podem proporcionar a melhoria da capacidade de suporte e resistência mecânica do solo.”

### 2.2.3 Fatores que influenciam as reações Cal-Solo

Segundo GUIMARÃES (2002), a técnica solo-cal baseia-se na inter-reação entre os elementos constituintes do solo, a cal e os componentes presentes no meio-ambiente, de maneira que a interdependência entre eles é traduzida através das reações químicas, físicas e físico-químicas que ocorrem durante todo o processo de estabilização do solo. Na figura 1 mostra esses fatores.

**Figura 1** - Fatores que influenciam as reações cal-solo.



Fonte: cal (GUIMARAES 2002)

## 2.4 ÁGUA

Água é a parte líquida que cobre aproximadamente 70 % da superfície terrestre, sob a forma de mares, lagos e rios. (AURELIO 2014). A importância da água potável no experimento é para obter uma densidade adequada na compactação da mistura, pois todo solo que precisa ser compactado, precisa dessa umidade para atingir uma densidade máxima.

## 2.5 BREVE HISTORICO

A cal é utilizada para materiais de aplicação em obras desde a época dos romanos, há cerca de 2.000 anos atrás. (HENRRIN E MITCHELL 1968) relatam que os romanos também foram os primeiros a utilizar um material pozolânico (pozolana), que adicionado à cal acelerava o processo de estabilização de solos, capaz de aglutinar partículas de solo, junto com água, fazendo o resultando tenha mais resistência física.

Uma das primeiras construções de estradas, que teve uso da técnica de estabilização com adição de Cal, a famosa “Via Ápia” é uma das principais estradas da antiga Roma que foi marcante na história da civilização. De acordo com (GUIMARÃES 2002) um dos maiores peritos da história da construção civil, a obra foi construída pelo censor romano Appius Cláudius e tinha o objetivo de ligar a porta de Roma a Brindisi, numa extensão de 584 km, a fim de transportar provisões, tropas e armamentos da costa Mediterrânea à costa Adriática. A Tabela 3 mostra as características das 4 camadas que mostra o perfil da estrada Via Ápia.

**Tabela 3-** Composição do perfil da “Via Ápia”

Camada 1	Basica(inferior), composta por pedras chatas do lipo laje, de 20 a 60cm, sobreposta ao subleito compactado.
Camada 2	De cascalho, composta de pequenas pedras misturadas com cal hidratada, tendo 22,5 cm de espessura.
Camada 3	Central, com aproximadamente 30 cm de espessura, composta de cascalho de pequena granulometria, areia grossa e cal. Guimaraes (2002) comenta que certamente essa composicao é que passou a ser conhecida como concreto romano.
Camada 4	Acima dessa camada de argamassa, ainda fresca, foi colocada a camada superior ou camada de rolamento ( de calcedonia de origem vulcanica), com cerca de 15cm de espessura.

**Fonte:** (GUIMARÃES, 2002)

Após vários anos, desde a época da civilização romana, varias técnicas utilizadas pela engenharia foram evoluídas, procurando sempre a obtenção de resultados mais eficazes e

econômicos, embora não mudassem a essência do seu modo de obtenção. À estabilização de solos com a adição da cal foi se espalhando lentamente nos Estados Unidos e aos poucos foi sendo usada em todo o mundo.

Quanto à utilização no Brasil, um dos primeiros trechos experimentais utilizando a técnica foi no ano de 1970, na duplicação da BR-040 no trecho Belo Horizonte- Sete Lagos, foi adicionado a cal ao subleito da rodovia BR/381, no segmento entre Nepomuceno e Três Corações, com intuito de redução da umidade do material, a rodovia ganhou mais resistência. Outras obras em destaques são: Aeroporto de Congonhas em São Paulo-SP e Avenida Sernabetiba em Guanabara-RJ.

Contudo, o comportamento das misturas solo-cal apresenta resultados bastante satisfatórios. A melhora foi tanta que a técnica continua sendo utilizada em rodovias até os dias de hoje.

## 2.6 ESTABILIZAÇÃO DE SOLO

Estabilização é o método usado para modificar significativamente algo. No solo é aplicado para alterar as características naturais.

A estabilização de solos consiste no melhoramento das propriedades mecânicas e químicas a fins de torná-lo estável para melhorar sua utilização, sob a ação de pesos e ações climáticas (BATISTA, 1976). Um dos principais métodos de estabilização para melhorar o solo é a utilização de estabilizantes químicos, que podem ser utilizados individualmente ou em conjunto, para uma melhoria nas propriedades no solo.

Para escolher o tipo de estabilização para ser realizada precisa ser visado a economia e custo benéfico, por isso é necessário ter conhecimento dos métodos de estabilização, dos mais tradicionais até os mais sofisticados que existem no mercado.

A estabilização de solos é um método que concede maior resistência às cargas, ao desgaste ou à erosão, através da compactação, correção de sua granulometria e plasticidade ou pela adição de substâncias que lhe atribuem coesão, resultante da cimentação ou aglutinação dos seus grãos (VARGAS, 1981).

## 2.7 MÉTODOS DE ESTABILIZAÇÃO

Os métodos para estabilizar os solos podem ser feitos com diferentes tipos de aditivos, produtos industriais ou resíduos industriais, pozolanas, cimento portland, cal e emulsão

betuminosa. O mais utilizado é o cimento portland e a cal. Pode ocorrer por um processo químico, mecânico ou químico-mecânico.

Químico: na adição de reagentes químicos para produzir uma ação cimentante, para alterar as propriedades dos grãos do solo, através da adição de cal, cimento ou subprodutos de indústrias.

Mecânico: é realizado por compactação, procedimentos que alteram apenas o arranjo das partículas do solo; ou por correção da granulometria, que é a adição ou retirada de partículas do solo (MEDINA, 2005; LIMA, 1993).

Químico-mecânico: é uma combinação das duas citadas acima. A necessidade de melhorar um solo deve-se a um dos seguintes fatores, a baixa capacidade de suportar cargas ou a elevada permeabilidade em solos de fundação ou pavimentação que, em virtude da sua localização, são difíceis de tratar por outras técnicas, porque os solos naturais são pouco apropriados à execução de fundações e pavimentação. (CRISTELO, 2001)

## 2.8 ESTABILIZAÇÕES QUÍMICAS

Segundo a *International Focus Group on Rural Road Engineering – (IFG 2005)*, o processo de estabilização química consiste na adição de um agente estabilizante ao solo, fazendo com que este atinja uma umidade ótima adequada, uma compactação eficiente e uma cura final que assegure a obtenção de uma resistência potencial satisfatória.

## 2.9 ESTABILIZAÇÕES DE SOLOS ATRAVÉS DA CAL

Ao fazer uma mistura de solo e cal em uma determinada quantidade, inicia-se um processo de reações químicas imediatamente que alteram as propriedades geotécnicas do solo, como a capacidade de carga, a quantidade de finos, granulometria e a plasticidade, essas características também dependem do tipo de solo a ser utilizado para estabilizar e o teor de cal usado, o tempo e a temperatura de cura, entre outros.

Em alguns tipos de solo, principalmente solos siltosos e argilosos, a mistura de solo-cal nem sempre atinge as propriedades desejadas como uma maior resistência, mesmo após um longo período de “cura” (OLIVEIRA, 2005).

A estabilização é um método muito eficaz porque faz-se o aproveitamento de solo existente no local da obra, ao invés de substituir por outros, evitando gastos adicionais e impactos ambientais (SILVA, 2010).

A estabilização de solos com o emprego da cal resulta em melhorias significativas na textura e estrutura do solo, minimizando a plasticidade e gerando uma elevação na resistência mecânica o que não é somente possível como provável (CRISTELO, 2001).

### **2.9.1 Vantagens:**

- Melhorar resistência e trabalhabilidade do solo;
- Redução da espessura da camada;
- Reduz plasticidade;
- Aumento da vida útil das estradas;
- Durabilidade da rodovia;
- Fundações em solos moles;

### **2.9.2 Desvantagens:**

- Processo química;
- Cal viva mais perigosa de utilizar;
- Preço da cal atualmente

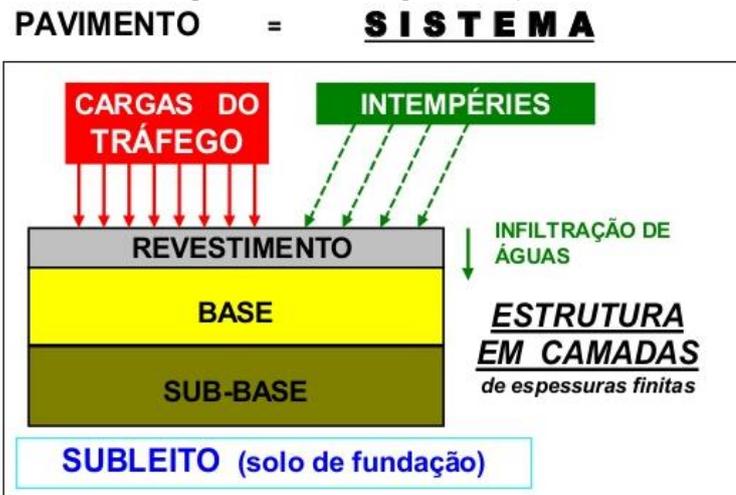
## **2.10 ESTABILIZAÇÕES DE SOLO PARA PAVIMENTAÇÃO**

Segundo a NBR-7207/82 da ABNT: "O pavimento é uma estrutura construída após terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto, a:

- a) Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- b) Melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- c) Resistir aos esforços horizontais que nela atuando, tornando mais durável a superfície de rolamento.

Na figura 2 mostra um exemplo de sistema de pavimentação, mostrando todas as camadas da estrutura

Figura 2- Sistema de pavimentação.



Fonte: <https://pt.slideshare.net/janayton8/fundamentos-de-pavimentao>

O Brasil é um dos países que mais utiliza o transporte rodoviário, tanto para o escoamento de produtos quanto para o transporte de pessoas. Segundo a *British Broadcasting Corporation- Brasil (2014)*, 58% do transporte no país são feitos por rodovias, e no *ranking* mundial fica atrás somente da Austrália. Portanto grande parte da população depende do transporte rodoviário.

A densidade da malha rodoviária pavimentada do Brasil é ainda muito pequena; São aproximadamente 25 km de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km<sup>2</sup> de área, o que corresponde a apenas 12,3% da extensão rodoviária nacional. (CNT 2016).

## 2.11 PAVIMENTAÇÃO

“Segundo DNER-700-GTTR, 1997, pavimento é uma estrutura construída após terraplenagem, destinada a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos dos veículos, a melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança e a resistir aos esforços horizontais, tornando mais durável a superfície de rolamento”

O pavimento rodoviário é a superestrutura composta por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre a infraestrutura ou terreno de fundação, denominada de subleito (DNIT, 2006). O pavimento é dimensionado para aguentar esforços do tráfego de veículos, e ações do clima, a fim de melhorar a locomoção das pessoas, com economia e segurança, sua estrutura depende da espessura de suas camadas e da rigidez destas e do subleito, assim como da interação entre as diferentes camadas do pavimento (BERNUCCI 2010).

### **2.11.1 Classificações dos Pavimentos**

Os pavimentos são classificados em:

- Flexíveis
- Rígidos
- Semi-rígidos

### **2.11.2 Pavimentos Flexíveis**

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), os pavimentos flexíveis são aqueles compostos por uma camada superficial asfáltica e com revestimentos, apoiadas em camadas de base, sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem adição de agentes cimentantes, e que sob carregamento sofre deformação elástica em todas as camadas, ou seja, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes e com pressões concentradas.

### **2.10.1 Pavimentos Rígidos**

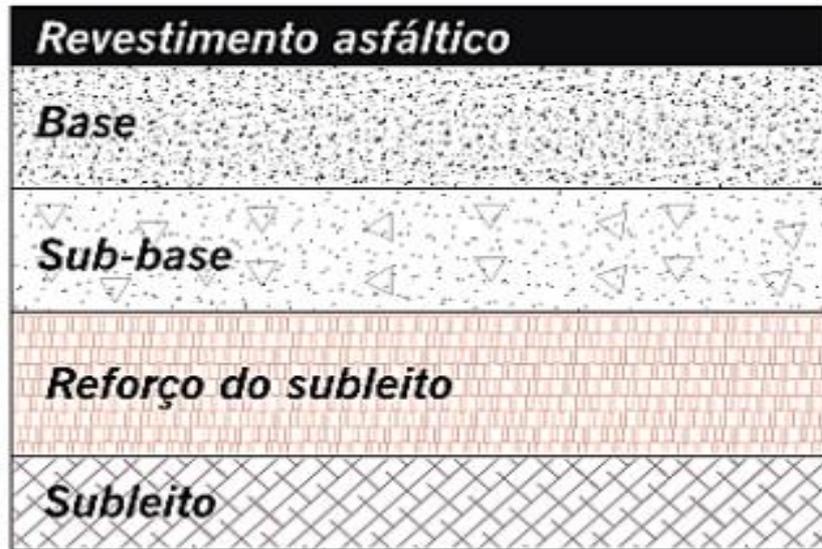
Segundo (BERNUCCI 2010), os pavimentos rígidos são aqueles em que o revestimento é constituído por placas de concreto de cimento Portland. Revestimento este que possui elevada rigidez em relação às camadas inferiores e espessura fixa em função da resistência à flexão das placas, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado.

### **2.10.2 Pavimentos Semi-Rígidos**

O pavimento semi-rígido é o tipo de pavimento constituído por revestimento asfáltico e camadas de base ou sub-base em material estabilizado com adição de cimento.

Na figura 3 mostra um revestimento asfáltico com a base, sub base, reforço do subleito e subleito

Figura 3- Revestimento asfáltico



Fonte: (BERNUCCI 2010)

### 2.10.3 Classificação de solo pelo Sistema Rodoviário

Na tabela 4, mostra a classificação dos solos segundo o sistema rodoviário de acordo com DNIT.

Tabela 4- Classificação dos solos segundo o Sistema Rodoviário

Classificação geral	Materiais granulares 35% (ou menos) passando na peneira N°200							Materiais silto – argilosos			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Glanuleometria- % passando na peneira											
N°10	50max										
N°40	30max	30max	51min								
N°200	15max	25max	10max	35max	35max	35max	35max	36min	36min	36min	36min
Características da fração passando na peneira N°40:											
limite de liquidez	-	-	-	40max	41min	40max	41min	40min	41max	40max	41min
índice de plasticidade	6max	6max	np	10max	10max	11min	11min	10min	10min	11min	11min

Índice de grupo	0	0	0	0	0	4 <sub>max</sub>	4 <sub>max</sub>	8 <sub>max</sub>	12 <sub>max</sub>	16 <sub>max</sub>	20 <sub>max</sub>
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areais siltosos ou argilosos			Solos siltosos		Solos argilosos		
Comportamento como subleito	Excelente a bom						sofrível a mau				

Fonte: (DNIT, 2006)

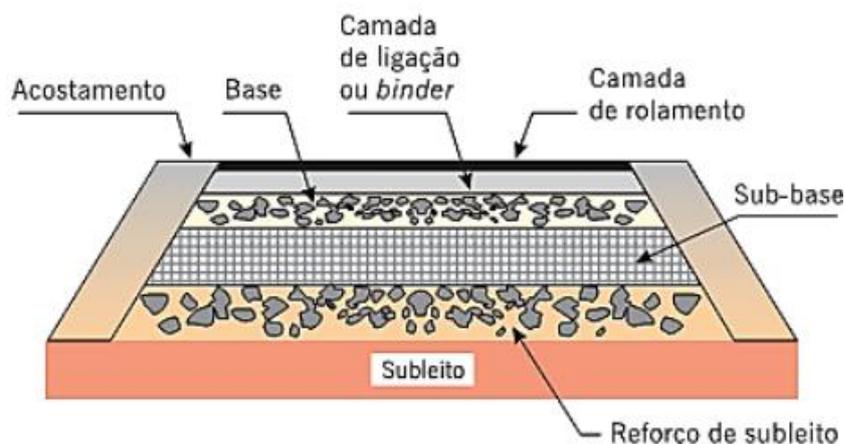
#### 2.10.4 Pavimento Rodoviário

O pavimento é constituído por quatro camadas principais:

- Subleito
- Reforço do subleito
- Sub-base
- Base

Na figura 4 mostra o pavimento rodoviário de acordo com o DNIT, o subleito, acostamento, base, camada de ligação ou binder, camada de rolamento e sub-sabe.

Figura 4- Pavimento rodoviário



Fonte: (DNIT, 2006)

#### 2.11 SUBLEITO

Usados para fundação, pavimentação e revestimento, é composto de material natural. Quando o terreno do subleito for irregular deve-se efetuar a regularização do mesmo.

### 2.11.1 Reforços Do Subleito

É a camada que desempenha função semelhante á da sub-base, sem especificações definidas, apenas com condições de apresentar características de suporte superiores às do subleito, executada com o objetivo de melhorar a capacidade de suporte de carga do subleito e de reduzir espessura da sub-base.

### 2.11.2 Sub-Base

Camada corretiva do subleito e complementar à base, com as mesmas funções desta, e executada quando, por razões de ordem econômica, for conveniente reduzir a espessura de base.

### 2.11.3 base

Camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os ao subleito, e sobre a qual se constrói o revestimento.

**Tabela 5-**Propriedades do solo para compor uma base rodoviaria

<b>Peneira</b>	<b>porcentagem</b>	<b>tolerancia</b>
2 1 /2	100%	-
Nº 4	50 a 100%	+ / -5%
Nº 40	15 a 50%	+ / -2%
Nº 200	5 a 35%	+ / -2%
Limite de liquidez	Maximo 40%	
Indice de plasticidade	Maximo 18%	

**Fonte:** (DNIT, 2006)

### 2.11.4 Revestimento

Camada mais acima do pavimento, que recebe diretamente as ações verticais e horizontais dos veículos, e destinada a melhorar as condições do rolamento quanto ao conforto e segurança.

## 2.12 RESISTÊNCIA DO SOLO AO CISALHAMENTO

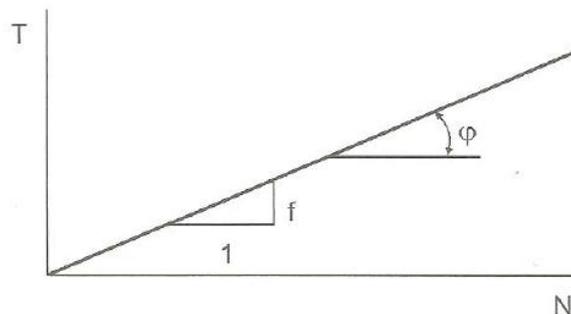
Craig (2011) cita que “Se, em um ponto qualquer plano dentro de uma massa de solo, a tensão cisalhante se tornar igual à resistência ao cisalhamento do solo, então ocorrerá ruptura nesse ponto”. A resistência ao cisalhamento é a máxima pressão que o solo pode suportar sem sofrer ruptura. A lei de cisalhamento é a relação que une no momento da ruptura e ao longo das superfícies de ruptura a tensão normal ou tensão de compressão ( $\sigma$ ) e a tensão tangencial ou tensão de cisalhamento ( $\tau$ ). A resistência ao cisalhamento envolve duas componentes: atrito e coesão.

### 2.12.2 Atrito

Pinto (2006) cita que “o fenômeno de atrito nos solos diferencia-se do fenômeno de atrito entre dois corpos porque o deslocamento envolve um grande número de grãos, que podem deslizar entre si ou rolar uns sobre os outros, acomodando-se em vazios que encontram no percurso.” E ainda, diz que a resistência por atrito entre as partículas pode ser representada com o deslizamento de um corpo sobre uma superfície plana horizontal. Na figura 5 é uma representação da resistência ao deslizamento segundo Pinto:

$$T = N \cdot \tan \varphi$$

**Figura 5-** Representação da resistência ao deslizamento.



**Fonte:** Pinto (2006)

Onde:

T: (c) coesão

f: força

N: nula

$\sigma$ : o ângulo de atrito interno do solo

Atrito é uma força de contato que atua sempre que dois corpos entram em choque e há tendência ao movimento, segundo Pinto na figura 6 é uma demonstração de atrito entre dois corpos no instante do deslizamento.

**Figura 6-**Atrito entre dois corpos no instante do deslizamento



Fonte: Pinto (2006)

Onde:

T: (c) coesão

N: nula

$\sigma$ : o ângulo de atrito interno do solo

R: resistência

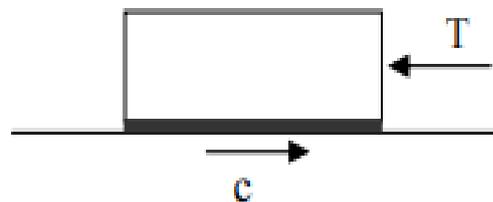
### 2.12.2 Coesão

Coesão é a Força de atração entre átomos e moléculas que constituem um corpo (AURELIO 2015) Segundo (VARGAS 1977), de uma forma intuitiva, a coesão é aquela resistência que a fração argilosa empresta ao solo, pelo qual ele se torna capaz de se manter coeso em forma de torrões ou blocos, ou pode ser cortado em formas diversas e manter esta forma. Na Figura 7 segundo pinto mostra a resistencia ao cisalhamento devido a coesão.

**Figura 7-** Resistência ao cisalhamento devido à coesão.

$$N \rightarrow 0 \text{ (Nula)}$$

$$T = c \text{ (coesão)}$$



Fonte: Pinto (2006)

A coesão é um atributo típico de solos muito finos (siltes plásticos e argilas) conforme ela aumenta com a quantidade de argila e atividade coloidal ( $A_c$ ); relação de pré adensamento; diminuição da umidade.

### 2.12.3 Resistência De Solos

Nos solos estão presentes os fenômenos de atrito e coesão, Então, determina-se a resistência ao cisalhamento dos solos ( $\tau$ ), representado pela fórmula:

$$\tau = c + \sigma \cdot \text{tg } \varphi \text{ ou } S = c + \sigma \cdot \text{tg } \varphi$$

Onde:

" $\tau$ " é a resistência ao cisalhamento do solo,

"c" a coesão ou intercepto de coesão,

" $\sigma$ " a tensão normal vertical

" $\varphi$ " o ângulo de atrito interno do solo

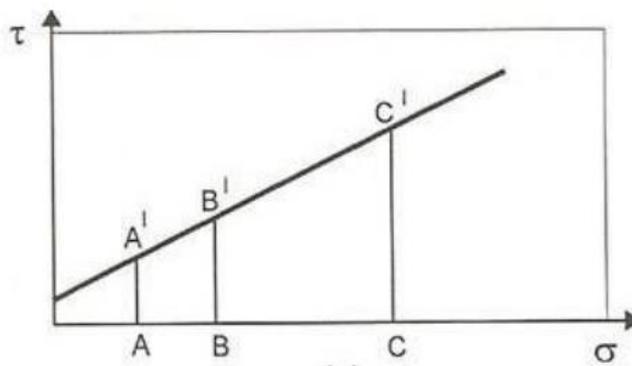
Na resistência de solo há uma necessidade de se conhecer a distribuição de tensões (pressões) nas profundidades abaixo do terreno para a solução de alguns problemas de recalques.

#### 2.12.4 Critérios de Ruptura

Os critérios de ruptura que melhor representam o comportamento dos solos são os de Coulomb (1776) e de Mohr (1900).

"Não há ruptura se a tensão de cisalhamento não ultrapassar um valor dado pela expressão  $c + f \cdot \sigma$ " (PINTO, 2006). sendo c e f constantes do material e  $\sigma$  a tensão normal atuante no plano de cisalhamento. Na figura 8 é uma representação do critério de ruptura de Coulomb.

**Figura 8-** Representação do critério de ruptura de Coulomb

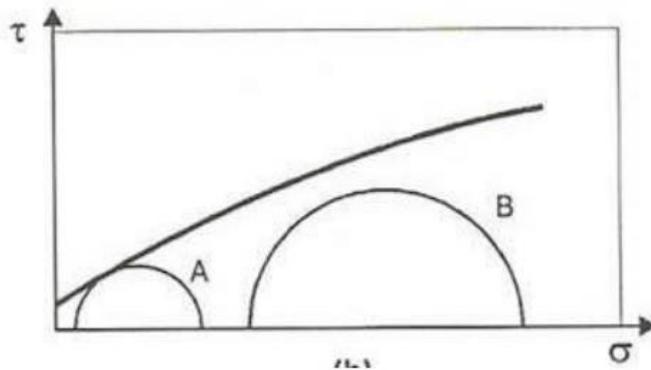


**Fonte:** Pinto (2006)

### 2.12.5 Critério De Mohr

Critério de Mohr “Não há ruptura enquanto o círculo representativo do estado de tensões se encontrar no interior de uma curva, que é a envoltória dos círculos relativos a estados de ruptura” (PINTO 2006). Na imagem 9 é uma representação do critério de ruptura de Mohr

**Figura 9-** Representação do critério de ruptura de Mohr



Fonte: Pinto (2006)

### 2.13 NORMAS E PROCEDIMENTOS

Segundo a (NBR 12770/1992) O ensaio de compressão simples é o método mais simples e rápido para determinar a resistência ao cisalhamento de solos coesivos e somente deste tipo de solo. O ensaio fornece o valor da coesão (resistência não drenada) de campo do solo, para isso deve ser feito com amostra e conservando sua umidade natural. Pode ainda ser usado para amostras de solos compactados.

### 3. ESTUDO DE CASOS

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DO ESTUDO

Esse estudo teve objetivo de verificar o Solo para uma possível pavimentação no estacionamento do Centro universitário de Anápolis Unievangélica, O solo tem finalidade de suportar construções e dar sustentação, e também determinar características fundamentais de todo projeto, incluindo nas pavimentações, por isso é necessário o conhecimento de suas propriedades, para estudar seu comportamento, visando isso decidimos realizar o estudo, colhendo amostras do nosso próprio campo, classificamos o solo pela tonalidade, textura, estrutura, aparência, consistência, permeabilidade, porosidade e reações do solo, o solo que fizemos os testes foi classificado como argiloso vermelho com pedregulhos, com um propósito de utilizar a técnica de estabilização do solo-cal com intuito de melhorias das propriedades do solo, essa pesquisa foi realizada no campus de Anápolis, e as amostras foram preparadas e ensaiadas no laboratório Engetec controle geotécnico Ltda., que fica localizado na cidade, e os resultados serão analisado graficamente e iremos apresentar a seguir.

Na imagem a seguir, é o trecho em que pegamos o solo, na terceira saída da Unievangelica.

Figura 10- faculdade Unievangélica



Fonte: google maps (2019)

### 3.2 PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS

O material foi colhido da base de um terreno da faculdade, com intuito de pavimentação, vamos sugerir algumas dosagens a fins de melhorar a base desse solo para melhorarmos, e verificar se a mistura será satisfatória em quesito resistência para asfaltar, o plano da coleta de dados se resume em ensaios de umidade, granulometria, compactação, densidade, expansão, penetração, expansão.

### 3.3 LOCAL DA AMOSTRA COLETADA

Amostra a seguir foi coletada no Centro universitário de Anápolis Unievangélica em um local, para uma suposta pavimentação, a imagens a seguir mostra o local da coletagem da amostra. A Figura 10 a seguir mostra o local que o solo foi retirado.

Figura 11- Solo espalhado no chão



Fonte: O próprio autor (2019)

Fizemos uma coleta de 80kg de solo, retirado da base da faculdade Unievangelcia, um solo argiloso vermelho e com pedregulhos, levamos para o laboratório da engetec localizado em anapolis para realizarmos alguns teste, antes de comecarmos os testes, espalhamos todo a amostra no chão com auxilio de uma vassoura e deixamos secar no sol por cerca de 60 minutos, para comecarmos a realização dos dos testes. Na figura 11 a seguir é o solo sendo espalhado no chão e alunos que estao realizando a pesquisa.

Figura 12- Local onde solo foi retirado



Fonte: O próprio autor (2019)

### 3.4 PROCEDIMENTO DE ENSAIOS E DESCRIÇÃO DE EQUIPAMENTOS

#### 3.4.1 Ensaio de caracterização

A amostra do solo foi colhida do solo de Anápolis no campus da unievangelica e os testes laboratoriais foram realizados no Laboratório de Engetec. De inicio determinamos utilizar a norma NBR 7.181/84 , NBR 6457/86, para moldarmos os corpos de prova e deixar submerso por 4 dias sob a água para depois rompermos.

#### 3.4.2 Granulometria

O teste de granulometria serve para determinar as dimensões das partículas do solo e das proporções relativas em que elas se encontram de acordo com a NBR 7.181/84 Esse material recolhido passou peneira de 2.0 mm, tomando-se a precaução de desmanchar no almofariz todos os torres eventualmente ainda existentes, de modo a assegurar a retenção na peneira somente dos grãos maiores que a abertura da malha de acordo com a norma (Solo – Análise Granulométrica). na figura 12 a seguir é o solo passando pela peneira com diâmetros determinado pela norma, para começarmos a realização dos testes.

Figura 13- Ensaio de glanulometria



Fonte: O próprio autor (2019)

A seguir logo apos o teste de granulomeria, separamos o solo em 5 recipientes, fizemos 5 diferentes dosagens de de agua para fazemos a curva glanulometrica, e 4 porcentagens diferentes de cal, para compararmos o a amostra natural, essas foram algumas dosagens para alterarmos a caracteristica natural do solo colhido. Na figura 13 a seguir são fotos retiradas do laboratorio que realizamos o teste, os recipientes com a dosagem de solo, e anotamos cada porcentagem e colocamos em cima para realizarmos os proximos testes.

Figura 14- Recipiente com solo



Fonte: O próprio autor (2019)

### 3.4.3 Ensaios de umidade

"O teor de umidade é definido como sendo a relação entre o peso da água existente no solo e o peso seco das partículas sólidas do solo, expressa em porcentagem" CAPUTO (1977).

Após o solo secar, e fazer o teste de separar os grãos, pegamos uma amostra que ficou retido na peneira 3 de acordo com a norma NBR 6.457/86, retiramos uma pequena quantidade, colocamos nessas cápsulas de acordo com a figura 14, em seguida colocamos em uma estufa em torno de 105°C ou 110°C por 24h.

Figura 15- Solo em capsula para fazer o ensaio de umidade



Fonte: O próprio autor (2019)

### 3.4.4 Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg determinam a quantidade de água necessária para mudança de estado de cada solo. Umidades mais elevadas fazem com que o solo se comporte como fluido denso caracterizado como estado líquido. À medida que o solo perde umidade, começa a se enrijecer e alterar o seu comportamento, passando para os estados plástico, semi-sólido e por último sólido (CAPUTO, 1988).

### 3.4.5 Limite de liquidez

O limite de liquidez é o limite pela passagem do estado plástico para o estado líquido devido à elevação da umidade. A normativa para a realização deste ensaio é a NBR 7180/84, que determina o LL em função do número de golpes no aparelho Casagrande, usamos 26 golpes.

### 3.4.6 Limite de plasticidade

O limite de plasticidade é determinado pelo cálculo da porcentagem de umidade para a qual o solo começa a se fraturar quando se tenta moldar um cilindro de 3 mm de diâmetro e

cerca de 10 cm de comprimento (CAPUTO, 2008). Para o ensaio de limite de plasticidade foram utilizados os procedimentos conforme a norma NBR 7180:1988.

### 3.4.7 Compactação

Pode-se também descrever a compactação como a densificação do solo por meio da remoção de ar, já que se aumenta o atrito grão a grão e se diminui o índice de vazios. O grau de compactação de um solo é medido com base no peso específico seco (DAS, 2013).

Utilizamos o método de Ensaio de compactação Proctor que é o procedimento mais utilizado para compactação de solo, e é um dos mais importantes. Através dele vamos obter a densidade, expansão e penetração desse solo, para descobrirmos o seu desempenho. A compactação que fizemos foi feita em camadas, colocando-se um determinado número de golpes em cada camada, fizemos 5 camadas, com soquete de dimensões, altura e peso de queda pré-definidos. O ensaio consiste em como compactar o solo com porcentagens de umidade em um molde cilíndrico de dimensões específicas. Na figura 15 mostra o solo com a dosagem sugerida, fizemos isso 5 amostras de 5 dosagens diferentes de água para fazer a curva de compactação e 5 dosagens de cal para verificar sua resistência, colocamos no cilindro de Proctor, e a partir daí foi compactada conforme a norma, utilizando o soquete, realizando 26 golpes por camada, em um total de 5 camadas. Após a compactação do material, foi necessário utilizar a régua biselada para retirar o excesso de material, que não pode ultrapassar 10 mm após a remoção do colarinho.

Figura 16- Solo fazer a compactação



Fonte: O próprio autor (2019)

### 3.4.8 Moldagem e cura dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova do nosso estudo foi feito de acordo com a NBR 6457/1986 e Seguindo os procedimentos de pesagem, mistura, compactação, des

moldagem, acondicionamento e cura submerso na água durante 4 dias. Fizemos 3 corpos de prova para cada teor de cal, fizemos 4 porcentagens diferentes de cal para comparamos com a natural. Os materiais pesados foram misturados completamente até que se obtivesse uma perfeita homogeneização. Na Figura 16 a segui mostra os corpos de provas ficaram submersos na água durante 4 dias como mostrado nas imagens para fazermos o rompimento e descobrimos o CBR e se ele atende o requisito que precisaremos para utilização do solo .

Figura 17- Corpos de prova submerso na água



Fonte: O próprio autor (2019)

### 3.4.9 Ensaio de ruptura

A resistência dos corpos de prova foi determinada através do ensaio de compressão simples, o corpo de prova foi acomodado na prensa entre dois cilíndricos metálicos alinhados com o eixo vertical do equipamento. Assim que iniciado o ensaio foram realizadas medições no anel em intervalos de tempo iguais. Como o deslocamento ocorria com velocidade constante, através da indicação do tempo era possível saber qual a deformação exata do corpo de prova. O cálculo da tensão foi realizado através das leituras multiplicadas pela constante do anel, somadas ao peso do cilindro metálico e da esfera, divididos pela menor área da sessão. Através destes resultados foi possível estabelecer gráficos relacionando a tensão e deformação para diferentes teores de cimento e diferentes tempos de cura. Parar determinar a massa específica utilizamos a norma NBR 10838:1988.

## 3.5 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

### 3.5.1 Solo

Solo coletado na base de um terreno no Centro universitário de Anápolis. O solo é um material físico no qual se faz obras, e se constrói qualquer infra-estrutura, e que possui uma grande variação nas suas propriedades físicas, pode ser usado em obras de pavimentação, Quando o solo não atende as especificações necessárias para o uso, existe algumas técnicas que são capazes de melhorar o solo, fazendo que fique mais apropriado para ser utilizado em pavimentação, por exemplo: a adição de cal, Assim para o solo ficar com características melhores, como resistência á deformação. Na figura 17 é uma amostra desse solo

Figura 18- Solo da unievangelica



**Fonte:** O próprio autor (2019)

### 3.5.2 Cal

A Cal Hidratada Itaú 20kg da Votanrantim é uma cal dolomítica de alta qualidade, que atende aos requisitos técnicos das normas ABNT, sendo indicada para a preparação de diversos tipos de argamassas por sua ação como aglomerante e plastificante. Além de propiciar plasticidade e liga, como outros aditivos para argamassa, o produto é o único com propriedades aglomerantes, trazendo maior resistência, aderência, elasticidade e economia para a argamassa. (CIMENTO VOTANRANTIM, 2017), na figura 18 é uma amostra do cal que usamos.

Figura 19- Cal utilizada



Fonte: O próprio autor (2019)

### 3.5.3 Água

A importância de utilizarmos a água potável para fazer os testes serve para obtermos uma densidade para a compactação da mistura, todo solo que necessita ser compactado, precisa fazer essa umidade para atingir a densidade máxima exigida por norma. Na figura 19 é a água que utilizamos no experimento.

Figura 20- Água



Fonte: O próprio autor (2019)

### 3.5.4. Balança

A principal função que exerce a balança no laboratório é a de pesar os itens que utilizaremos para melhorar o solo por exemplo: material retido, cal. A medida da balança é a

precisão, a balança pode variar de varias formas quando comparamos as balanças comerciais e as industriais. Na figura 20 é uma imagem da balança que utilizamos.

Figura 21- balança de precisão



Fonte: O próprio autor (2019)

### 3.5.5 Peneira

Para separar os grãos e verificar o tamanho dos grãos para realizar os testes, e verificar a caracterização desse solo e sua glanulometria, na figura 21 é uma amostra de uma peneira que utilizamos nos ensaios.

Figura 22- Peneira utilizada



Fonte: O próprio autor (2019)

### 3.5.6 Moldes para corpo de provas

Os moldes do corpo de prova servem para realizar os ensaios e depois romper o solo para termos uma resposta sobre sua resistência, e temos que verificar se o molde atende

as normas para uma melhor precisão, e se esta de acordo com os parâmetros de aceitação. Na figura 22 é uma imagem dos moldes que utilizamos.

Figura 23- Molde utilizado



Fonte: O próprio autor (2019)

### 3.5.7 Equipamento proctor

De acordo com (TORRES GEOTECNIA 2016) O ensaio Proctor Normal utiliza o cilindro de 10 cm de diâmetro, altura de 12,73cm e volume de 1.000cm<sup>3</sup> é submetida a 26 golpes de um soquete com massa de 2,5Kg e caindo de 30,5cm. Corresponde ao efeito de compactação com os equipamentos convencionais de campo. O ensaio Proctor Modificado utiliza o cilindro de 15,24 cm de diâmetro, 11,43 cm de altura, 2.085 cm<sup>3</sup> de volume, peso do soquete de 4,536 kg e altura de queda de 45,7 cm aplicando-se 55 golpes por camada. É utilizado nas camadas mais importantes do pavimento, para os quais a melhoria das propriedades do solo, justifica o emprego de uma maior energia de compactação. O ensaio denominado Proctor Intermediário difere do modificado só pelo número de golpes por camada que corresponde a 26 golpes por camada, sendo aplicado nas camadas intermediárias do pavimento. Na imagem 23 mostra o equipamento de proctor

Figura 24- Equipamento de proctor



Fonte: O próprio autor (2019)

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 AMOSTRA NATURAL DO SOLO

A seguir serão apresentados os resultados para os ensaios de granulometria, limites de Atterberg e ensaios de Proctor para determinação da umidade ótima e peso específico, os resultados do ensaio de granulometria por peneiramento. Utilizando-se como base para classificação do solo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) o mesmo se enquadra como argila vermelha com pedregulhos. Essa é a análise do solo em estado natural de acordo no a NBR 7181 E NBR 7182, sem adicionar aditivos, para analisamos as características do solo sem aditivos, nas tabelas a seguir na tabela 6 a as amostras do solo, umidade, umidade higroscópica , resumo E seu peneiramento grosso material retido e peneiramento fino com material retido, peso do material, compactação e seu CBR

**Tabela 6-** características da amostra natural

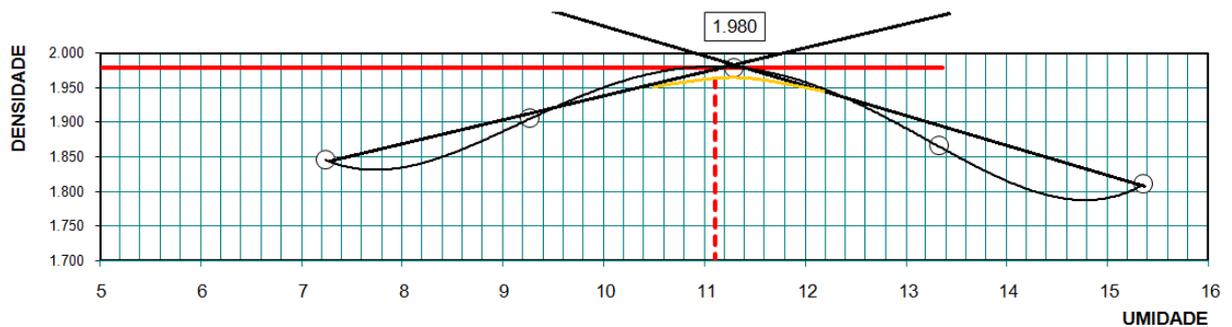
<b>RESUMO</b>							AMOSTRA TOTAL SECA (G)	1970,7	
PEDREG.: AC 4,8 mm	24,1						AMOSTRA TOTAL ÚMIDA	2000,0	
AREIA GROS: 4,8 - 2,0 mm	9,1						RETIDO PEN. N. 10 (G)	658,9	
AREIA MÉD: 2,00 - 0,42 mm	10,5						PASSANDO PEN. N. 10 UMIDA (G)	1341,1	
AREIA FINA 0,42 -0,074 mm	22,6						PESO DA ÁGUA	19,7	
PASSANDO No. 0,074 mm	33,6						PASSANDO PEN. N. 10 (G) SECA	1321,4	
RET.: No. 2,00 -0,074 mm	33,1						AMOSTRA TOTAL SECA	1980,3	
TOTAL	100,0						AMOSTRA MENOR N. 10 UMIDA	120,0	
							AMOSTRA MENOS N. 10 SECA	118,2	
<b>UMIDADE</b>							<b>UMIDADE HIGROSCÓPICA</b>		
CÁPSULA N°							36	34	
C + S + A (g)							95,82	98,71	
C + S (g)							94,55	97,53	
A - ÁGUA (g)							1,27	1,18	
C - CÁPSULA (g)							13,06	14,38	
S - SOLO (g)							81,49	83,15	
UMIDADE - H (%)							1,6	1,4	
UMI. MÉDIA (%)								1,49	
<b>COMPACTAÇÃO</b>									
ÁGUA ADICION. (g)	340	460	580	700	820		PESO MATERIAL		
% ÁGUA ADIC.	5,7	7,7	9,7	11,7	13,7		6000		
UMIDADE ADIC. %	5,8	7,8	9,8	11,8	13,9		PESO MAT. SECO		
UMID. COMPACT %	7,2	9,3	11,3	13,3	15,4		5912		
N° DO MOLDE	44	722	19	22	139		CILINDROS		
M + S + A (g)	8.136	8.296	9.260	8.896	8.200		N°	PESO	VOLU ME
M - MOLDE (g)	4.006	3.718	4.465	4.606	3.864		44	4006	2086

S + A (g)	4.130	4.578	4.795	4.290	4.336		722	3718	2199
DENS. ÚMIDA kg/m <sup>3</sup>	1,980	2,082	2,203	2,114	2,089		19	4465	2177
DENS. CONVERT. kg/m <sup>3</sup>	1,874	1,934	2,008	1,893	1,838		22	4606	2029
DENS. SECA kg/m <sup>3</sup>	1,846	1,905	1,979	1,866	1,811		139	3864	2076
<b>DENS. MÁXIMA kg/m<sup>3</sup> =</b>	<b>1980</b>	<b>h. ótima % =</b>	<b>11,1</b>		<b>C.B.R % =</b>	<b>36,8</b>		<b>EXP. % =</b>	<b>0,00</b>

Fonte: (Laboratório Engtec 2019)

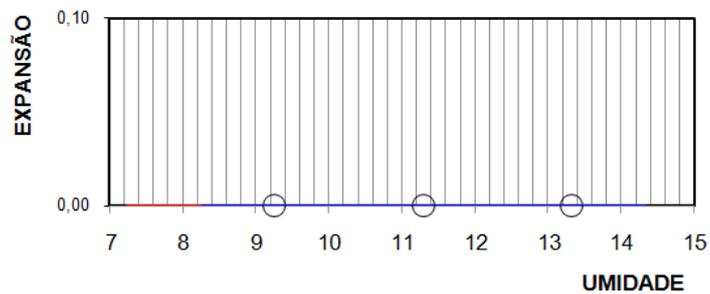
No gráfico a seguir com o ensaio de Proctor identificamos as seguintes curvas: na figura 24 é a curva de densidade, na figura 25 é a curva de expansão, no figura 26 é a curva do CBR.

Figura 25 - gráfico de densidade da amostra

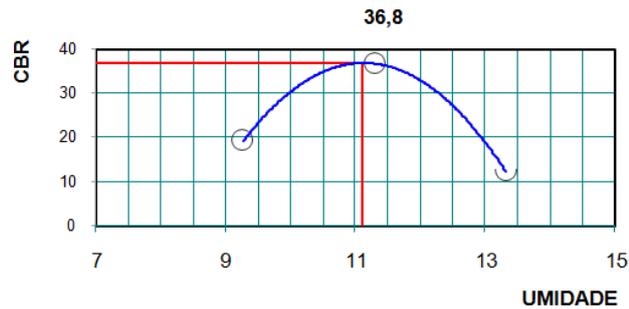


Fonte: (Laboratório Engtec 2019)

Figura 26- gráfico de expansão da amostra



Fonte: (Laboratório Engtec 2019)

**Figura 27** - gráfico do CBR da amostra

Fonte: (Laboratório Engtec 2019)

Órgãos fiscalizadores como o DNIT apresentam especificações que os solos devem apresentar para que estes possam ser utilizados como base para um pavimento. Segundo o DNIT, o CBR apresentado pelo material deve atingir valores superiores a 80 (NORMA DNIT 172/2016). Na nossa amostra natural o CBR atingiu 36,8 nesse caso iremos tentar melhorar ele com a cal a fins de pavimentação para base.

#### 4.1.2 Amostra do solo com 2%

A caracterização do solo pode evitar problemas na execução e desempenho da mistura solo-cal. A seguir serão apresentados os resultados do CBR para modificarmos esse solo a fins de resistência para utilizarmos na pavimentação. Na tabela 7 a seguir mostraremos o solo com amostra com 2% de cal adicionada.

**Tabela 7-** característica da amostra com 2%cal.

COMPACTAÇÃO									
ÁGUA ADICION. (g)	340	460	580	700	820		PESO MATERIAL		
% ÁGUA ADIC.	5,7	7,7	9,7	11,7	13,6		6000		
UMIDADE ADIC. %	5,8	7,8	9,7	11,9	13,8		PESO MAT. SECO		
UMID. COMPACT %	7,2	9,3	11,2	13,4	15,3		5912		
Nº DO MOLDE	37	26	727	754	68		CILINDROS		
M + S + A (g)	7.840	7.300	9.001	9.526	8.358		Nº	PESO	VOLU ME
M - MOLDE (g)	3.345	3.324	4.456	5.468	3.987		37	3877	2753
S + A (g)	4.678	4.443	4.434	4.345	4.785		26	3345	2864
DENS. ÚMIDA kg/m³	1,876	1,456	2,235	2,567	2,876		798	4456	2987
DENS. CONVERT. kg/m³	1,234	1,325	1,999	1,987	1,765		788	5345	2065
DENS. SECA kg/m³	1,763	1,845	1,899	1,987	1,840		69	3454	2110
<b>DENS. MÁXIMA kg/m³ =</b>	<b>1980</b>	<b>h. ótima %=</b>	<b>11,1</b>		<b>C.B.R %=</b>	<b>50,4</b>		<b>EXP. % =</b>	<b>0,00</b>

Fonte: (Laboratório Engtec 2019)

Verificamos que o solo atingiu um CBR de 50,4 ganhou resistência de 40% uma boa resistência referente ao solo natural possa não a quantidade significativa que esperávamos como o intuito do trabalho é a pavimentação, essa porcentagem não seria adequada.

#### 4.1.3 Amostra do solo com 3%

A seguir serão apresentados os resultados do CBR para modificarmos esse solo a fins de resistência para utilizarmos na pavimentação. Na tabela 8 a seguir mostraremos o solo com amostra com 3% de cal adicionada.

**Tabela 8-** característica da amostra com 3%cal.

COMPACTAÇÃO									
ÁGUA ADICION. (g)	340	460	580	700	820		PESO MATERIAL		
% ÁGUA ADIC.	5,7	7,7	9,7	11,7	13,7		6000		
UMIDADE ADIC. %	5,8	7,8	9,8	11,8	13,9		PESO MAT. SECO		
UMID. COMPACT %	7,2	9,3	11,3	13,3	15,4		5912		
Nº DO MOLDE	37	26	728	755	69		CILINDROS		
M + S + A (g)	7.900	7.486	9.140	9.926	8.468		Nº	PESO	VOLU ME
M - MOLDE (g)	3.762	3.024	4.696	5.468	3.966		37	3762	2189
S + A (g)	4.138	4.462	4.444	4.458	4.502		26	3024	2247
DENS. ÚMIDA kg/m <sup>3</sup>	1,980	1,986	2,118	2,143	2,123		728	4696	2098
DENS. CONVERT. kg/m <sup>3</sup>	1,789	1,844	1,931	1,919	1,867		755	5468	2080
DENS. SECA kg/m <sup>3</sup>	1,763	1,817	1,903	1,891	1,840		69	3966	2121
<b>DENS. MÁXIMA kg/m<sup>3</sup> =</b>	<b>1910</b>	<b>h. ótima % =</b>	<b>12,1</b>		<b>C.B.R % =</b>	<b>64,1</b>		<b>EXP. % =</b>	<b>0,00</b>

Fonte: (Laboratório Engtec 2019)

Verificamos que o solo atingiu um CBR de 64,1 ganhou resistência de 100% uma excelente resistência referente ao solo natural, teve o dobro de resistência porém não a essa porcentagem não seria adequada para pavimentação nas normas do DNIT, inclusive com essa dosagem o solo pode ser utilizado para sub-base.

#### 4.1.4 Amostra do solo com 4%

A seguir na tabela 9 iremos apresentar os resultados do CBR para modificarmos o solo da unievangelica no campus de anapolis a fins de ganhar resistência para utilizarmos na pavimentação, nessa amostra utilizaremos a mistura de 4% de cal.

**Tabela 9-** característica da amostra com 4%cal.

<b>COMPACTAÇÃO</b>									
ÁGUA ADICION. (g)	460	580	700	820	940		PESO MATERIAL		
% ÁGUA ADIC.	7,6	9,7	11,7	13,7	15,7		6000		
UMIDADE ADIC. %	7,7	9,8	11,8	13,9	15,9		PESO MAT. SECO		
UMID. COMPACT %	9,3	11,2	13,2	15,4	17,4		5912		
Nº DO MOLDE	769	2	3	18	666		CILINDROS		
M + S + A (g)	7.834	8.814	10.124	8.546	8.492		Nº	PESO	VOLU ME
M - MOLDE (g)	3.243	4.375	5.714	4.245	4.116		779	3987	2234
S + A (g)	4.046	4.999	4.410	4.324	4.376		2	4657	2234
DENS. ÚMIDA kg/m <sup>3</sup>	1,916	2,234	2,118	2,088	2,234		3	5765	2345
DENS. CONVERT. kg/m <sup>3</sup>	1,689	1,345	1,897	1,837	1,876		18	4234	2234
DENS. SECA kg/m <sup>3</sup>	1,663	1,810	1,869	1,810	1,748		666	4116	2234
<b>DENS. MÁXIMA kg/m<sup>3</sup> =</b>	<b>1980</b>	<b>h. ótima % =</b>	<b>12</b>		<b>C.B.R % =</b>	<b>75,5</b>		<b>EXP. % =</b>	<b>0,00</b>

Fonte: (Laboratório Engtec 2019)

Verificamos que o solo atingiu um CBR atingiu de 140% da resitencia referente ao solo natural, e notamos que a cada 1% acionado teve melhoria de 40% em cada amostra, porem o valor atingido não seria adequada para pavimentação nas normas do DNIT.

#### 4.1.5 Amostra do solo com 5%

Na tabela 10 a seguir mostraremos os resultados dos testes realizados com 5% de cal, no solo da unievangelica classificado como solo argila vermelha com pedregulhos a fim de pavimenta-lo.

**Tabela 10-** característica da amostra com 5%cal.

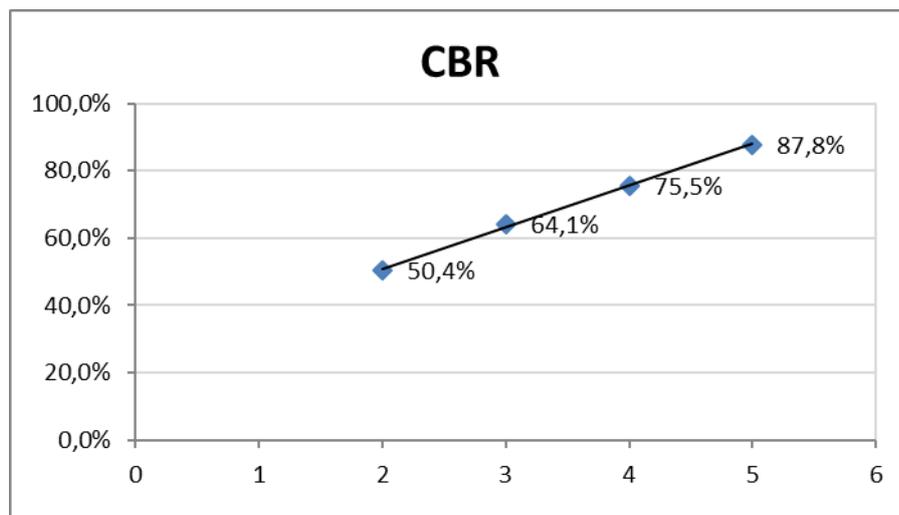
<b>COMPACTAÇÃO</b>									
ÁGUA ADICION. (g)	460	580	700	820	940		PESO MATERIAL		
% ÁGUA ADIC.	7,7	9,7	11,7	13,7	15,7		6000		
UMIDADE ADIC. %	7,8	9,8	11,8	13,9	15,9		PESO MAT. SECO		
UMID. COMPACT %	9,3	11,3	13,3	15,4	17,4		5912		
Nº DO MOLDE	779	2	3	18	666		CILINDROS		
M + S + A (g)	7.898	8.824	10.124	8.546	8.492		Nº	PESO	VOLU ME
M - MOLDE (g)	3.842	4.385	5.714	4.245	4.116		779	3842	2106
S + A (g)	4.056	4.439	4.410	4.301	4.376		2	4385	2190
DENS. ÚMIDA kg/m <sup>3</sup>	1,926	2,036	2,118	2,088	2,052		3	5714	2082
DENS. CONVERT. kg/m <sup>3</sup>	1,789	1,857	1,897	1,837	1,774		18	4245	2060
DENS. SECA kg/m <sup>3</sup>	1,763	1,830	1,869	1,810	1,748		666	4116	2133
<b>DENS. MÁXIMA kg/m<sup>3</sup> =</b>	<b>1870</b>	<b>h. ótima % =</b>	<b>13,1</b>		<b>C.B.R % =</b>	<b>87 ,8</b>		<b>EXP. % =</b>	<b>0,00</b>

Fonte: (Laboratório Engtec 2019)

Verificamos que o solo atingiu um CBR de 87,8 como pelas normas no DNIT a regra é ter 80, esse solo esta adequado para fazer a pavimentação, e nosso estudo foi satisfatorio.

#### 4.2 Comparação dos resultados

Na imagem a seguir é um comparativo de todos os resultados que obtivemos nos nossos testes, e que foi satisfatorio pois conseguimos fazer com que o CBR aumentasse sua resistencia.

**Tabela 11-** demonstrativo de todas as amostras

Fonte: o proprio autor (2019)

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Concluiu-se que esse trabalho trouxe resultados satisfatórios para a área de estabilização química de solos voltada para pavimentação, comprovando que a adição de cal em solos promove um ganho expressivo de resistência no mesmo. Comprovou se também que a escolha correta da dosagem da cal influência de maneira direta no resultado do estudo.

O solo objeto desse estudo foi uma Argila vermelha com vestígios de pedregulhos no qual suas características foram descritas ao longo do corpo desse trabalho, depois de realizados todos os ensaios verificou-se que a quantidade de aglomerante ideal para a estabilização do solo é de 5%.

Em relação ao custo benefício verificou-se que é satisfatório, porque ganhou resistência quanto outros aditivos e com valor mais acessível.

Concluimos que a cada 1% de cal adicionada o solo ganhou resistência de 40%, caso o solo tenha somente essa porcentagem para melhorar ficaria viável a utilização desse método, no caso do solo que fizemos o teste precisaríamos de um ganho muito alto, talvez se optássemos por outro aditivo teria mais custo benefício, como por exemplo o cimento que já deve seu uso comprovado a superioridade do mesmo como aditivo para a estabilização química de solos, também levando se em consideração a relação ao preço sendo que um saco de 50 kg de cimento custa cerca de R\$ 19.00 e um saco de 20 kg de cal hidratada custa cerca R\$ 14.00 preço consuntado na cidade de Ánapolis.

Além disso a cal tem o teor volumétrico que possui relação com a porosidade, provando que com o aumento do teor volumétrico ocorre uma diminuição na porosidade, e em consequência um aumento na resistência da mistura.

Portanto, é de extrema importância a realização de estudos nessa área, a fim de obter mais dados sobre quais aditivos são indicados para cada tipo de solo. Além disso, a utilização de materiais considerados resíduos torna a estabilização sustentável, algo imprescindível nos dias de hoje.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6502. Rochas e solos – método de ensaio, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6453. Cal virgem para construção civil – comissão de estudo de métodos de ensaios de cal virgem e cal hidratada, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12770. solo coesivo - determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6457. Preparação de ensaios para compactação e ensaio de caracterização – Método de ensaio, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7181. Determinação do limite de plasticidade – Método de ensaio, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7182. solo - ensaio de compactação– método de ensaio, 1984.

AZEVÊDO, André Luis. Estabilização de solos com adição de cal. um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. 2010 Dissertação (mestrado em engenharia geotécnica)

ARAÚJO, Arielton Fonteles. Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do estado do ceará. Programa de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – CE. Brasil. 2009.

BATISTA, J. E. P. A cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. 1ª ed. São Paulo: PINI. 1998.

BERNUCCI et al. Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras, 2008. /default\_territ\_area.shtm> Acesso em: 12nov. 2018

BONAFÉ, Leandro. Estudo da resistência de um solo Residual de basalto estabilizado e Reforçado 2004-trabalho de conclusão de curso (engenharia civil) - Universidade regional do noroeste do estado do rio

CAPUTO, Homero Pinto. Mecânica dos solos e suas aplicações. Volume 1: fundamentos. 6.ed., rev. e ampl., [9. Impr.]. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CRISTELO, N. M. C. Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, UM, Portugal, 2011.

COULOMB, Charles Augustin . Portal Educação. Consultado em 05 de agosto de 2018

GUIMARÃES, J. E. P. A cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. 1ª ed. São Paulo: PINI. 1998.

DICIONARIO AURELIO. Dicionário online do wikiHow, 03 Set. 2018. Disponível em < <https://www.dicio.com.br/aurelio-2/>>. Acesso em 03 set. 2018

DAS, Braja M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. São Paulo: Thomson Learning, 2007

DNIT (2006). Manual de Pavimentação. Publicação IPR-179. Departamento Nacional de Infra-estruturas de Transportes, Rio de Janeiro.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. Notas de Aula da Disciplina Pavimentação. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2006

CRISTOVÃO, J. V. Materiais Cimentados a Se rem Utilizados Como Bases e Sub-Bases de Pavimentos Rodoviários: Correlações Genéricas da Razão Entreas Resistências à Tração e à Compressão. São Paulo: 34º Reunião Anual de Pavimentação, 2003.

OLIVEIRA, Shirley Minnel Ferreira de. Estudo do comportamento mecânico de misturas de fofogesso e cal para a utilização na construção rodoviária. 2005. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 2005.

MEDINA, J. A. R. Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos. Rio de Janeiro: Livros écnicos e científicos, 1995.

PINTO, Carlos de Souza. Curso básico de mecânica dos solos. 3ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SARTORI, guilherme . Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de campo mourão.2015- trabalho de conclusão de curso (engenharia civil) - UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

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

VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos solos. São Paulo: Editora McGraw – Hilldo Brasil LTDA, 1914.