

**UNIEVANGÉLICA**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**LAIZY GONÇALVES MAIA  
THAYARA DA SILVA SILVEIRA**

**ESTUDO COMPARATIVO DO CUSTO-BENEFÍCIO ENTRE  
CAL E CIMENTO USADOS COMO ESTABILIZANTES DE  
SOLO NA PAVIMENTAÇÃO**

**ANÁPOLIS / GO**

**2020**

**LAIZY GONÇALVES MAIA  
THAYARA DA SILVA SILVEIRA**

**ESTUDO COMPARATIVO DO CUSTO-BENEFÍCIO ENTRE  
CAL E CIMENTO USADOS COMO ESTABILIZANTES DE  
SOLO NA PAVIMENTAÇÃO**

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

**ORIENTADORA: VANESSA HONORATO DOMINGOS**

**ANÁPOLIS / GO: 2020**

## FICHA CATALOGRÁFICA

MAIA, LAIZY GONÇALVES/ SILVEIRA, THAYARA DA SILVA

Estudo comparativo do custo-benefício entre cal e cimento usados como estabilizantes de solo na pavimentação

69p 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2020).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. Solo	2. Estabilizantes
3. Cimento	4. Cal
I. ENC/UNI	II. Bacharel

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MAIA, Laizy Gonçalves; SILVEIRA, Thayara da Silva. Estudo comparativo do custo-benefício entre cal e cimento usados como estabilizantes de solo na pavimentação. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO, 69 pg. 2020.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Laizy Gonçalves Maia

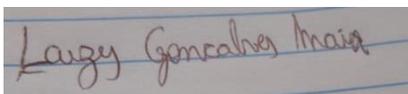
Thayara da Silva Silveira

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Estudo comparativo do custo-benefício entre cal e cimentos usados como estabilizantes de solo na pavimentação.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

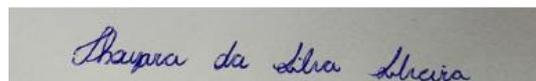
ANO: 2020

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.



---

Laizy Gonçalves Maia  
E-mail: laizym@gmail.com



---

Thayara da Silva Silveira  
E-mail: thayaratss@gmail.com

**LAIZY GONÇALVES MAIA  
THAYARA DA SILVA SILVEIRA**

**ESTUDO COMPARATIVO DO CUSTO-BENEFÍCIO ENTRE  
CAL E CIMENTO USADOS COMO ESTABILIZANTES DE  
SOLO NA 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:**

---

**VANESSA HONORATO DOMINGOS, Mestra (UniEVANGÉLICA)  
(ORIENTADORA)**

---

**EDUARDO MARTINS TOLEDO, Mestre (UniEVANGÉLICA)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**PAULO ALEXANDRE DE OLIVEIRA, Mestre (UniEVANGÉLICA)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

**DATA: ANÁPOLIS/GO, 04 dezembro de 2020.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a Deus por nos proporcionar força e perseverança durante nossa vida e em nossa caminhada durante os anos de graduação. Aos nossos pais que sempre nos ampararam e nos incentivaram e nossas irmãs pela amizade e atenção. A UniEVANGÉLICA e todos os nossos professores pelo ensino, dedicação e atenção em nos passar conhecimento. A nossa professora orientadora Vanessa Honorato, por toda a atenção, empenho, comprometimento e ensinamentos que permitiram a realização deste trabalho. A Rafaela, técnica responsável pelo laboratório, que sempre nos auxiliou na execução dos ensaios de forma solícita e prestativa. Aos amigos da graduação pelo conhecimento compartilhado, ajuda e cooperação.

Laizy Gonçalves Maia e Thayara da Silva Silveira

## RESUMO

A maior parte das rodovias nacionais encontram-se em condições ruins ou péssimas, sendo improcedente com a realidade do Brasil, país de dimensões continentais que possui o meio rodoviário como principal meio de transporte de pessoas e mercadorias. Um dos métodos utilizados para aumentar a durabilidade da pavimentação é o uso de aditivos que melhoram as características dos solos, que à primeira vista seriam considerados inapropriados para uso nas camadas do pavimento. Os dois materiais mais utilizados como aditivos são a cal e o cimento. O objetivo deste trabalho consiste na verificação de qual aditivo apresenta melhor custo-benefício frente a um solo coeso de base e sub-base de pavimento. Para fazer esta análise, foi definida a proporção do teor de cada aditivo, foram realizados ensaios de granulometria, compactação, expansão e Índice de Suporte Califórnia (ISC) e efetuada a comparação dos resultados. A análise granulométrica foi efetuada por meio dos ensaios de peneiramento e sedimentação que revelaram que a classificação do solo em estudo foi de argila areno siltosa. A proporção definida de cimento e de cal em relação à massa total do solo foi de 10%. O cimento utilizado para a realização dos ensaios foi o CP II-F-32 e a cal utilizada foi a CH-III. Observou-se no ensaio de compactação que o solo-cimento obteve peso específico aparente seco mais elevado do que o solo-cal, e este obteve maior umidade ótima do que o solo-cimento. Foi constatado que o solo que recebeu cimento como aditivo, apresentou baixas expansões, mas a amostra que recebeu cal apresentou expansões ainda menores que o solo-cimento. Por meio do ensaio de ISC, foi notado que solo-cal e solo-cimento obtiveram resultados muito semelhantes. Realizou-se um levantamento da média de preço dos dois aglomerantes (solo e cimento). Após a verificação de todos os resultados pôde-se inferir que os dois aditivos obtiveram o mesmo desempenho frente ao solo estudado, trazendo custo benefício similar.

### **PALAVRAS-CHAVE:**

Pavimento. Cimento. Cal, Aditivos ISC. Solo-cal. Solo-cimento.

## **ABSTRACT**

Most of the national highways are in bad or terrible conditions, being unfounded by the reality of Brazil, a country of continental dimensions that has the road as the main means of transporting people and goods. One of the methods used to increase the durability of the pavement is the use of additives that improve the characteristics of the soil, which at first sight would be considered inappropriate for use in the pavement layers. The two materials most used as additives are lime and cement. The objective of this work is to verify which additive has the best cost-benefit ratio against a cohesive base and sub-base floor. To carry out this analysis, the proportion of the content of each additive was defined, granulometry, compaction, expansion and California Support Index (ISC) tests were carried out and the results were compared. The granulometric analysis was carried out by means of sieving and sedimentation tests, which revealed that the soil under study was made of silty sandy clay. The defined proportion of cement and lime in relation to the total mass of the soil was 10%. The cement used for the tests was CP II-F-32 and the lime used was CH-III. It was observed in the compaction test that the soil-cement obtained a higher specific dry weight than the soil-lime, and this obtained a higher optimum humidity than the soil-cement. It was found that the soil that received cement as an additive showed low expansions, but the sample that received lime showed even smaller expansions than soil-cement. Through the ISC test, it was noticed that soil-lime and soil-cement obtained very similar results. A survey of the average price of the two binders (soil and cement) was carried out. After verifying all the results, it could be inferred that the two additives obtained the same performance in relation to the studied soil, bringing similar cost benefit.

### **KEYWORDS:**

Floor. Cement. Lime, ISC. Additives. Lime soil. Cement soil

.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pavimento Rígido detalhe/real.....	25
Figura 2 - Pavimento flexível detalhe/real. ....	26
Figura 3 - Pavimento semi-rígido.....	26
Figura 4 - Compactação com pé-de-carneiro. ....	30
Figura 5 - Estabilização química. ....	33
Figura 6 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas .....	34
Figura 7 - Solo-cal.....	39
Figura 8 - Solo-cimento.....	44
Figura 9 - Local da retirada do solo.....	45
Figura 10 - Solo natural.....	46
Figura 11 - Centro Tecnológico.....	47
Figura 12 - Equipamentos para sedimentação.....	48
Figura 13 – Hexametáfosfato de Sódio (defloculante).....	50
Figura 14 - Balança e peneiras finas.....	52
Figura 15 - Equipamentos para compactação.....	54
Figura 16 - Tanque de imersão.....	56
Figura 17 - Prensa para determinação do ISC.....	57
Figura 18 – Curva granulométrica.....	58
Figura 19 - Gráfico compactação mistura solo – cimento.....	60
Figura 20 – Gráfico compactação mistura solo-cal.....	61
Figura 21 - ISC para solo – cimento.....	66
Figura 22 - ISC para solo – cal.....	67

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades do solo. ....	33
Quadro 2 - Fatores que afetam o comportamento das misturas de solo-cimento.....	42

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Tipos de cimento. ....	40
Tabela 2 - Quantidade solo para cada ensaio .....	46
Tabela 3 - Cálculo peneiramento grosso e fino. ....	49
Tabela 4 - Cálculo de sedimentação. ....	51
Tabela 5 - Energias de compactação. ....	53
Tabela 6 - Sedimentação sem defloculante. ....	59
Tabela 7 - Sedimentação com defloculante. ....	59
Tabela 8 - Resultados da compactação solo-cimento. ....	61
Tabela 9 - Resultados da compactação solo-cal. ....	62
Tabela 10 - Expansão solo-cimento. ....	63
Tabela 11 - Expansão solo – cal. ....	64
Tabela 12 - ISC solo-cimento. ....	65
Tabela 13 – ISC solo-cal. ....	66

## LISTA DE ABREVIATURA E SIGLA

ABCP	Associação Brasileira Cimento Portland
ACI	American Concrete Institute
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AASTHO	Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários do Transporte
CNT	Conferência Nacional do Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FGV	Fundação Getúlio Vargas
GOINFRA	Agência Goiana de Infraestrutura e Transportes
IFG	<i>International Focus Group on Rural Road Engineering</i>
ISC	Índice de Suporte a Califórnia
LTEC	Laboratório Técnico e Engenharia LTDA
NLA	<i>National Lime Associaton dos Estados Unidos</i>
PAC	Programa de Aceleração ao Crescimento

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>20</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	21
1.2 OBJETIVOS .....	22
<b>1.2.1 Objetivo geral .....</b>	<b>22</b>
<b>1.2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>22</b>
1.3 METODOLOGIA .....	23
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>24</b>
2.1 PAVIMENTO .....	24
<b>2.1.1 Tipo de pavimentos .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1.2 Camadas.....</b>	<b>27</b>
2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS .....	29
2.3 ADITIVOS.....	33
<b>2.3.1 Cal.....</b>	<b>35</b>
<b>2.3.2 Solo-cal .....</b>	<b>36</b>
<b>2.3.3 Cimento .....</b>	<b>39</b>
<b>2.3.4 Solo-cimento.....</b>	<b>40</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>45</b>
3.1 SOLO E LOCAL .....	45
3.2 NORMAS.....	47
<b>3.2.1 Granulometria .....</b>	<b>47</b>
<b>3.2.2 Compactação.....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.3 Índice de suporte a califórnia (ISC).....</b>	<b>55</b>
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>
4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	58
<b>4.1.1 Ensaio granulométrico .....</b>	<b>58</b>
<b>4.1.2 Compactação.....</b>	<b>60</b>
<b>4.1.3 Expansão .....</b>	<b>63</b>
<b>4.1.4 Índice de Suporte a Califórnia (ISC).....</b>	<b>65</b>
4.2 COMPARATIVOS ENTRE CAL E CIMENTO.....	68
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
5.1 SUGESTÕES FUTURAS .....	70

**REFERÊNCIAS ..... 71**

## 1 INTRODUÇÃO

O principal modal de transporte adotado pelo Brasil é o rodoviário, tornando incongruente a atual situação das rodovias. Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019), em 2018, apenas 12,5% das rodovias eram pavimentadas. O que acarreta prejuízos em vários níveis como: atraso na entrega de mercadorias, maior gasto de combustível, danos ao veículo, a perda de produtos, desconforto ao usuário, entre outros.

Ainda de acordo com a CNT (2019) cerca de 52,4% do pavimento, dos 108.863 km pesquisados, encontram-se com problemas. Também foi constatado pela pesquisa, que as condições das rodovias geram impacto direto nos custos de transporte. Estimou-se em 2019, que pavimentação em más condições elevaram o custo operacional do transporte em aproximadamente 28,5%.

Contudo, não faltam investimentos nesse setor, apenas no ano de 2019 o governo federal destinaria R\$ 2 bilhões do orçamento do Ministério da Infraestrutura para manutenção e pavimentação de rodovias estaduais (AGENCIA BRASIL, 2019). Enquanto isso, no Estado de Goiás, o Governo do Estado, por meio da Agência Goiana de Infraestrutura e Transportes (GOINFRA), investiu R\$ 360 milhões para obras de conclusão, implantação, manutenção e duplicação de 18 rodovias estaduais para entrega até 2020 (GOINFRA, 2020).

O Departamento de Infra Estrutura de Transportes (DNIT) realiza um levantamento de custos bimestral denominado Custo Médio Gerencial, desenvolvido em conjunto com a Fundação Getúlio Vargas (FGV). Segundo a planilha, elaborada em 19 de janeiro de 2018, tendo como mês base julho de 2017, o custo médio para implantação de uma rodovia com pista simples, com faixa de 3,6 m e acostamento de 2,5 m seria de R\$3.159.000 reais por quilômetro. Portanto, verifica-se diante destes dados o elevado custo para a implantação de uma rodovia. Além disso, percebe-se que há vários investimentos neste setor, mas que são baixos, sendo insuficientes para suprir a demanda, visto que as estradas federais e estaduais necessitam de manutenção precoce (no caso de novas rodovias) e constante, pois mesmo sofrendo reparos, raramente se encontram em boas condições (CNT,2017).

Segundo Berberian (2013), o método brasileiro de dimensionamento de rodovias foi criado em 1960, não incorporando materiais e tecnologias mais modernos e não há pessoal qualificado. Ele ainda afirma que o revestimento asfáltico não é o mais importante na pavimentação e que o solo não é compatível com a água, que não pode adentrar a base e sub-base do pavimento, pois toda a estrutura será enfraquecida.

O pavimento se trata de uma estrutura constituída por diversas camadas, tendo como finalidade a resistência aos esforços originados do tráfego de veículos. De acordo com o Programa de Aceleração de Crescimento (PAC, 2018), a pavimentação deverá proporcionar conforto à população, limpeza e níveis adequados de velocidade, economia e segurança no transporte.

Dentre os inúmeros materiais contabilizados nos custos de pavimentação, encontram-se aditivos estabilizantes, que tem como principal objetivo a correção do solo nativo, visando melhorias em suas propriedades físicas e mecânicas, como suporte de cargas e ações climáticas. Estes aditivos proporcionam grande economia, pois permitem que solos locais que seriam inapropriados inicialmente, se adequem a necessidade do projeto para a construção de bases e sub-bases, eliminando a necessidade de importação de outro solo (HOMY QUIMICA, 2018).

Os tipos de estabilizantes químicos mais comuns são: cimento Portland e cal hidratada. Descoberto pelo empresário, Joseph Aspdin em 1824, na ilha britânica de Portland, o cimento trata-se de um pó fino com propriedades ligantes que endurece sob presença de água, oferecendo resistência mecânica (ABCP, 2019). Enquanto a cal é um aglomerante obtido da calcinação do calcário (MARQUES, 2006), sendo utilizado como estabilizante de solo pelos romanos há mais de 2000 anos. Era o ligante mais amplamente usado até o início do século XX, mas entrou em declínio com a descoberta do cimento Portland, pois este possuía menor tempo de cura e melhor desempenho (COELHO *et al.*, 2009).

Comparando-se valores de cimento e cal, verificou-se que um saco de cimento de 50 kg custa em média 24 reais e um saco de 20 kg de cal, custa em média 11 reais, desta forma constata-se que 1 quilo de cimento é mais barato do que 1 quilo de cal. Avaliando no quesito somente econômico, o uso de cimento seria o mais apropriado para uso na pavimentação, no entanto seria necessário um estudo detalhado para aferir qual dos dois aditivos apresentaria maiores vantagens em níveis tanto econômicos quanto de aperfeiçoamento de solo, visto que a escolha dependerá também do solo a ser tratado e das propriedades desejadas, portanto é primordial a execução de uma pesquisa para averiguar qual geraria um maior custo-benefício, aliando qualidade e redução de custos na pavimentação.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Ao observar a realidade das rodovias brasileiras, em que também se nota altos gastos em pavimentação, seja em implantação ou manutenção, a busca por redução de custos

combinada a melhoria na qualidade do pavimento asfáltico é o que motiva a realização do presente trabalho.

De acordo com o CNT (2017), o transporte rodoviário é o responsável pelo tráfego de mais de 60% das mercadorias que circulam pelo país e pelo transporte de aproximadamente 90% dos passageiros, o que demonstra que o Brasil é totalmente dependente das rodovias e estradas, portanto todos os problemas que elas possuem acabam gerando prejuízos à população.

Segundo a Pesquisa CNT de Rodovias 2016, 48,3% da extensão total das rodovias que foram avaliadas apresentam algum tipo de problema no pavimento, sendo constatadas em situação regular, ruim ou péssima. Além disso, o Tribunal de Contas da União (TCU) revelou no Acórdão nº 328/2013, que as rodovias federais e estaduais manifestam problemas funcionais e estruturais muito precocemente. Neste acórdão foi constatado que os problemas surgem, aproximadamente sete meses após a conclusão da obra. Já o tempo médio para apresentar problemas funcionais foi de quatorze meses, sendo que o tempo médio de vida útil esperado (para pavimento flexível), é de aproximadamente dez anos.

Tendo em vista que a utilização de aditivos estabilizantes traz grandes melhorias ao solo, sendo que cal e cimento são bastante utilizados como aditivos na base e sub-base na pavimentação, busca-se encontrar qual aditivo trará maior viabilidade, fornecendo economia e qualidade na pavimentação das rodovias brasileiras.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Realizar o estudo comparativo entre dois aditivos estabilizantes: cal e cimento, verificando qual é o mais economicamente viável na base e sub-base de um pavimento.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Com o intuito de alcançar o objetivo geral, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Determinar proporção: aditivo estabilizante (cal e cimento) e solo;
- Realizar ensaios de granulometria, compactação, expansão, ISC para o solo;
- Comparar a resistência à penetração quando adicionado cal e cimento;
- Verificar qual aditivo apresenta o melhor custo benefício.

### 1.3 METODOLOGIA

Foi utilizado o método de pesquisa explicativa, com a finalidade de realizar um comparativo entre os aditivos estabilizantes através de experimentos em laboratório. Os parâmetros terão como base, testes realizados com um único solo proveniente de aterro da cidade de Anápolis com diferentes traços de cal e cimento Portland.

O trabalho será fundamentado em normas técnicas, livros, plataformas online de fontes confiáveis, artigos científicos, trabalhos acadêmicos.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A divisão do trabalho se dá em cinco capítulos, onde a estrutura está determinada da seguinte maneira:

Capítulo I: expõe o tema que foi abordado na introdução, apresentando os objetivos, justificativa e metodologia que foram utilizados neste trabalho;

Capítulo II: apresenta a fundamentação teórica, abordando tipos de pavimentos, estabilizantes, camadas do pavimento, elucida o solo-cimento e solo-cal;

Capítulo III: Foi abordada a metodologia para chegar aos objetivos;

Capítulo IV: Resultados, onde foram apresentados os resultados encontrados a partir dos ensaios realizados nos laboratórios;

Capítulo V: Conclusão, onde foi realizada as considerações finais sobre o que foi abordado no trabalho.

..;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo são apresentados alguns conceitos pertinentes ao trabalho, como: definição das camadas dos pavimentos, tipo de estabilizantes, definição de cal e cimento e elucidação do solo-cal e solo-cimento.

### 2.1 PAVIMENTO

O pavimento se caracteriza por uma estrutura de diversas camadas com determinadas espessuras, sendo implantada acima da superfície final de terraplenagem, com função técnica e econômica para suportar os esforços provenientes do clima e do tráfego de veículos, assegurando aos usuários melhorias nas condições de rolamento, segurança, conforto e economia (BERNUCCI *et al.*, 2006).

O pavimento rodoviário é normalmente classificado em dois tipos básicos: flexível e rígido. Geralmente, tem-se utilizado a nomenclatura de pavimentos asfálticos e pavimentos de concreto de cimento Portland, conforme o tipo de revestimento (BERNUCCI *et al.*, 2006). O DNIT (2006) inclui mais uma classificação, que seria o pavimento semirrígido.

#### 2.1.1 Tipo de pavimentos

- Pavimento rígido

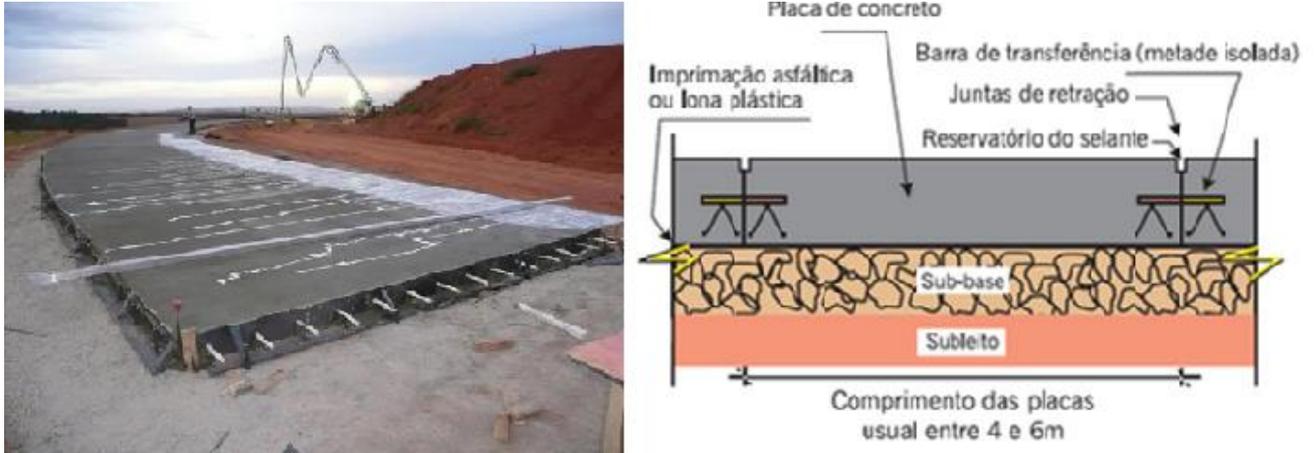
Nos pavimentos de concreto, o revestimento é composto por placas de concreto de cimento Portland, podendo ser armadas ou não. São executadas sobre a camada de sub-base, rejeitando-se a realização da camada de base (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Este revestimento possui elevada rigidez em comparação às camadas abaixo, absorvendo quase todas as tensões oriundas do carregamento aplicado (DNIT, 2006). A camada de sub-base pode ser confeccionada com material granular, semelhante aos pavimentos asfálticos ou com concreto compactado com rolo, dependendo do tráfego solicitado e da vida útil que se pretende alcançar (DNIT, 2017).

A espessura desses pavimentos é determinada de acordo com a resistência a flexão das placas de concreto e da resistência das camadas inferiores (BERNUCCI *et al.*, 2006).

O pavimento rígido possui menos camadas que o flexível, sendo composto basicamente por: subleito, sub-base e revestimento de placa de concreto, conforme demonstrado na Figura 1.

**Figura 1 - Pavimento Rígido detalhe/real.**



Fonte: (CONCREPAV, 2020) e (DNIT, 2006)

- Pavimento Flexível

O pavimento asfáltico é constituído por uma mistura composta principalmente de agregados e ligantes asfálticos, sendo que a camada superior deve resistir ao tráfego e transmitir às camadas inferiores de forma moderada, ainda possui função de impermeabilização da via e proporcionam conforto e segurança (DNIT, 2017).

Neste tipo de pavimento, as camadas sofrem deformação elástica significativa, devido ao carregamento aplicado, logo a carga se distribui de forma quase equivalente entre as camadas. São normalmente formados por 4 camadas: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (DNIT, 2006).

O revestimento asfáltico pode ser constituído por camada de rolamento em contato direto com as rodas dos veículos e camadas de ligação ou intermediárias. Algumas camadas podem ser suprimidas dependendo do tráfego, da espessura das camadas, da rigidez e das condições ambientais (BERNUCCI *et al.*, 2006).

O pavimento flexível é composto pelas seguintes camadas: subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento, que é constituído por camada de rolamento e camada de ligação, conforme demonstrado na Figura 2.

**Figura 2 - Pavimento flexível detalhe/real.**



Fonte: (ILCON, 2019) e (DNIT, 2006)

- Pavimento semi-rígido

Caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades com propriedades cimentícias como por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica (DNIT, 2006). O pavimento semirrígido é constituído pelas seguintes camadas: revestimento asfáltico, base cimentada, sub-base granular, reforço do subleito e subleito, conforme demonstrado na Figura 3.

**Figura 3 - Pavimento semi-rígido.**



Fonte: (SUPRIMENTO, 2018)

### 2.1.2 Camadas

As camadas do pavimento, geralmente, são constituídas do revestimento para o leito em: base, sub-base, leito, subleito, reforço do subleito e revestimento.

- Base

Possui como finalidade a resistência e distribuição das cargas oriundas do tráfego, reduzindo a transmissão desses esforços às camadas subjacentes. Normalmente é constituída por materiais estabilizados granulometricamente ou quimicamente, por meio de aditivos como cal, cimento, betume, entre outros. É executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito, devendo estar compactada e regularizada (DNIT, 2017). Materiais normalmente utilizados para compor a base: brita graduada, macadame hidráulico e macadame seco, solo agregado e materiais estabilizados granulometricamente, solo arenoso fino laterítico solo-cimento, solo-cal e brita graduada tratada com cimento. Estes materiais granulares e a base devem apresentar  $CBR \geq 80$  e expansão  $\leq 0,5\%$  (medida com sobrecarga de 10 lbs) (DNIT,2006).

- Sub - base

Camada complementar à base, possuindo tamanho variável, construída quando por motivos econômicos ou técnicos, não for possível somente a realização da camada de base sobre a regularização ou reforço do subleito. Pode ser executada para diminuir a espessura da base, realizando as mesmas funções, mas de forma complementar (DNIT, 2017).

Tem como função suportar as cargas transmitidas pela base e refrear a ascensão da água por capilaridade. É uma camada compactada e regularizada sobre o subleito ou reforço do subleito (DNIT, 2017). Os materiais utilizados basicamente são os mesmos da sub-base, e assim como esta, devem apresentar de acordo com o DNER,  $CBR \geq 20$  e expansão  $\leq 1\%$  (medida com sobrecarga de 10 lbs) (DNIT, 2006).

- Leito e Sub - leito

O leito se consiste pela superfície adquirida como resultado da terraplanagem e moldada ao seu greide.

Já o subleito é a fundação de todas as camadas do pavimento (DNIT, 2006). É responsável por absorver definitivamente todos os esforços verticais oriundos do tráfego e é composta por material consolidado e compactado. É delimitado na superfície pelo pavimento e deve ser analisado até onde as cargas impostas pelo tráfego são expressivas, variando entre 0,6 e 1,5 metro (CNT, 2017).

Acima do subleito encontra-se a camada de regularização, constituída por uma faixa do nivelamento do subleito, executada sobre ele com a função de conformá-lo transversal e longitudinalmente. Não é considerada uma camada do pavimento propriamente dito (CNT, 2017).

- Reforço do sub - leito

Camada de espessura constante, executada por conjunturas técnico-econômicas, sobreposta ao subleito regularizado com propriedades inferiores ao material da camada superior, porém melhores que o do subleito (DNIT, 2006). É parte constituinte do pavimento, complementando a sub-base. Tem como objetivo resistir e distribuir os esforços oriundos da ação do tráfego. Sua espessura longitudinal é variável, dependendo diretamente do projeto do pavimento (CNT, 2017). Os materiais e o reforço devem apresentar CBR maior que o do subleito e expansão  $\leq 2\%$  (DNIT, 2006).

Usualmente é construído em caso de estruturas espessas, como consequência de fundação de baixa qualidade ou do tráfego de cargas pesadas, podendo ser uma combinação dos dois (CNT, 2017).

- Revestimento

Camada impermeável que sofre diretamente a ação do rolamento, com a finalidade de melhorá-la, proporcionando conforto e segurança (DNIT, 2006). Deve ser capaz de resistir aos desgastes para aumentar a vida útil do pavimento e poderá ser constituída por duas ou mais camadas. Pode ser composta por paralelepípedos, blocos pré-moldados de concreto, pedras cortadas justapostas, tratamentos superficiais betuminosos e misturas asfálticas em geral (CNT, 2017). O concreto betuminoso usinado a quente, pode ser considerado a mistura mais utilizada para realização do revestimento. É uma mistura composta de agregados minerais (naturais ou artificiais), de cimento asfáltico de petróleo e de material fino (cimento Portland, pó de pedra e

outros). A camada de revestimento deve ser composta de componentes bem aglutinados para evitar sua movimentação horizontal. (BALBO, 2016)

## 2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

O solo é um componente de suma importância para um projeto de pavimentação, no entanto não é sempre que os solos naturais se adequam as exigências e especificações do projeto. Algumas prováveis soluções são: evitar um terreno com solo inapropriado, substituir o solo inadequado por outro apropriado, alterar o projeto adequando-o ao solo do terreno ou estabilizar o solo já preexistente (MEDINA, 1987).

A resposta para solucionar o problema dependerá de fatores econômicos e práticos, pois é um elemento determinante na qualidade e no custo. Sem contar aspectos como volume de corte e aterro, tipo de solo que se encontra no local, distância das jazidas, áreas de empréstimo, também devem ser avaliados, uma vez que influem diretamente no custo final da obra (BATISTA, 1976).

Por conta das dificuldades técnicas, econômicas, sociais e ambientais, a melhor solução seria melhorar o solo existente, aprimorando suas propriedades, que é o que se denomina estabilização ou melhoramento de solos (CRUZ, 2004).

A estabilização de solos é uma técnica milenar, elaborada de forma primitiva, sendo aperfeiçoada com o tempo. Tem sido apontada como uma das principais preocupações dos pesquisadores da área da engenharia civil e geotecnia que procuram por soluções eficazes e mais econômicas. É um método executado para estabilizar e suplementar as características de resistência do solo, potencializando a adequação deste para o uso estabelecido. De acordo com os autores tradicionais, a estabilização poderá ser executada por métodos mecânicos ou químicos (LAUFER, 1967; MOUSAVI *et al.*, 2017). Cruz (2004) ainda afirma a existência da estabilização física.

- Estabilização mecânica

É o método apontado como o mais antigo e mais utilizado na construção de estradas, realiza uma melhoria oriunda das alterações no sistema trifásico, isto é, na proporção dos elementos sólidos, líquidos e gasosos. Pode ser executada por compactação, processo que

modifica somente o arranjo dos grãos do solo, ou por correção da granulometria que é a remoção ou adição de partículas do solo (MEDINA *et al.*, 2005; LIMA *et al.*, 1993).

Por meio de uma energia externa de compactação empregada sobre o solo, é possível reduzir os vazios, impedindo a percolação da água e a erosão que ela provoca, elevando a durabilidade, densidade, compacidade e como resultado a resistência mecânica do solo. Na maioria dos solos, a compactação é responsável pelo aumento da estabilidade mecânica, no entanto Little (1995) ressalta que em diversas ocasiões, somente a compactação não é o bastante, especialmente quando o solo é coesivo ou apresenta granulometria fina. Nestes casos, a compactação terá que ser utilizada concomitantemente com outros métodos de estabilização (LITTLE, 1995; MEDINA, 2005; SANTOS, 2012). Na Figura 4, é apresentada uma estabilização mecânica realizada por meio de compactação, utilizando rolo pé de carneiro.

**Figura 4 - Compactação com pé-de-carneiro.**



**Fonte: (SAFEL,2020)**

Em contrapartida, a correção granulométrica se trata da aglutinação e mistura de dois ou mais tipos de solos, em proporções apropriadas para se obter um material homogêneo, bem graduado, com percentual moderado de partículas finas e posterior compactação. Este método, possui o objetivo de assegurar a estabilidade do solo e a elevação da resistência mecânica, através do contato entre os grãos de partículas maiores e o preenchimento dos vazios com os grãos de partículas menores (VILLIBOR, 1982). De acordo com Araújo (2009), este processo possibilita uma menor permeabilidade e maior densidade.

- Estabilização química

Neste processo o solo tem sua estrutura mudada, possuindo maior resistência, menor compressibilidade e permeabilidade do que o solo natural. Com a adição de estabilizantes ao solo nativo, ocorrem reações químicas que permitem alcançar a umidade ótima para uma boa compactação, proporcionando o preenchimento dos poros e garantindo a melhoria das propriedades mecânicas e físicas do solo, para atingir a resistência requerida em projeto (MAKUSA, 2013; MEDINA, 1987).

Os resultados obtidos pelo método vão decorrer principalmente das reações químicas que ocorrem entre o estabilizador e os minerais existentes no solo. Os estabilizantes aplicados podem ser cimento Portland, cal, betumes, pozolona, produtos industrializados e resíduos industriais (MAKUSA, 2013; MEDINA, 1987). No entanto, é importante ressaltar que a equipe de estudo da designação dos solos de fundação de pavimentos rodoviários, reunido no “*Workshop on Improved Pavement Design*” realizado em março de 1996, e que tinha como meta primordial elaborar o Guia 2002 da Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários do Transporte (AASHTO), somente levou em consideração a estabilização com cimento, cal, betume e cal/cinzas (LITTLE, 1999 *apud* CRISTELO, 2001).

Este método tem sido bastante utilizado em alguns países, como Portugal, sobretudo em obras rodoviárias. O tratamento com ligantes hidráulicos é justificado pela demanda de cunho econômico e por uma preocupação ecológica. A evolução deste método construtivo está ligada ao progresso tecnológico dos últimos anos, propiciando rendimentos consideráveis e um aumento na qualidade da obra (CRISTELO, 2001). Dos diferentes produtos químicos empregados para a estabilização, o cimento é o que possui uso mais difundido, devido à sua acessibilidade e maior adequação a solos não coesivos (CRUZ, 2004).

Tendo com enfoque a busca por métodos mais sustentáveis, econômicos e seguros, tem-se os seguintes benefícios (CRUZ, 2004):

- Minimização da perda de material gerada pela erosão ou tráfego nas estradas de terra;
- Diminuição dos gastos de compra, transporte e distribuição de agregados;
- Redução dos materiais soltos na superfície, originadores de acidentes;
- Minimização da agressão ao meio ambiente, ocasionada pela criação de pedreiras e britagem;
- Redução do uso de combustível ligado as inúmeras manutenções rodoviárias;

- Poupar as jazidas para utilidades mais nobres.

Dentre os diversos métodos de estabilização, é importante verificar qual técnica se adapta melhor às necessidades, visto que o método escolhido não será obrigatoriamente infalível, em que todas as características do solo são modificadas para melhor. Portanto, uma aplicação precisa de qualquer procedimento requer a pontuação clara de quais propriedades do solo planeja-se melhorar. Para que a escolha seja a mais próxima do ideal, devem ser observados os seguintes aspectos (CRUZ, 2004):

Meta alcançada pela estabilização (propriedades a alterar, duração do melhoramento, etc);

- Área e espessura do solo que será tratado;
- Tipos de solo e suas propriedades;
- Materiais à disposição para executar a estabilização;
- Equipamento e empresas especializadas;
- Aspectos ambientais;
- *Know how* e preferências locais
- Tempo disponível
- Custos

Para que a realização de uma estabilização de solo seja bem sucedida, é preciso efetuar ensaios laboratoriais e testes de campo, no entanto os ensaios em laboratório atingem resistências maiores do que o mesmo material em campo, mas auxiliam na avaliação da eficácia dos materiais estabilizados no campo e ajudam na definição do tipo de estabilizante e de sua quantidade. Permeabilidade, força, estabilidade, compressibilidade e durabilidade do volume são as características mais buscadas pelos engenheiros (MAKUSA, 2013).

O *International Focus Group on Rural Road Engineering* – IFG (2005) destaca a utilização da cal e do cimento para aperfeiçoar solos naturais instáveis, para viabilizar o uso destes em camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários. Este grupo determina um critério de escolha, entre os dois estabilizantes, embasado no tamanho das partículas do solo que será tratado e na plasticidade, como apresentado no Quadro 1:

Quadro 1 - Propriedades do solo.

Tipo de Estabilização	Propriedades do Solo					
	Mais que 25% passando na peneira de 0,075mm			Menos que 25% passando na peneira de 0,075mm		
	IP ≤ 0	10 ≤ IP ≤ 20	IP ≥ 20	IP ≤ 6 LP ≤ 60	6 < IP ≤ 10	IP > 10
Cimento	Sim	Sim	*	Sim	Sim	Sim
Cal	*	Sim	Sim	Não	*	Sim

Fonte: IFG (2005).

É importante salientar que as características do solo a ser tratado, não são o único critério determinante para a escolha do melhor estabilizante. Segundo Guimarães (2002), independentemente do método de estabilização aplicado, seja ele mecânico ou químico, ele será influenciado por inúmeras razões, dentre elas evidenciam-se: finalidade da obra, custo, características dos materiais e propriedades do solo que necessitam ser melhoradas. Ele também descreve que os solos das regiões tropicais úmidas, recebem tratamentos insatisfatórios sobre seus defeitos, devido às inúmeras propriedades diferentes e desempenhos, demandando mais pesquisas e estudos para alcançar procedimentos mais apropriados (ARAÚJO, 2009). Na Figura 5, está demonstrado a estabilização química por meio de processo de execução do solo-cal.

Figura 5 - Estabilização química.



Fonte: NOBREGA PIMENTA (2020)

### 2.3 ADITIVOS

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), as bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas podem ser classificadas nos seguintes tipos: granulares e estabilizantes com aditivos, conforme a Figura 6.

As bases e sub-bases granulares podem ser classificadas conforme o processo utilizado para tratamento do solo, que poderá ser por estabilização granulométrica ou por macadame hidráulico, sendo que a estabilização granulométrica poderá ocorrer de três formas distintas: solo brita, brita graduada ou brita corrida.

As bases e sub-bases também serão classificadas dependendo do aditivo empregado no processo de estabilização, geralmente são utilizados os seguintes materiais apresentados pelo DNIT (2006): cimento, cal e betume.

**Figura 6 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas**



**Fonte: Manual de Pavimentação (2006).**

Será dado destaque aos solos estabilizados com cimento e cal, portanto, não será abordado o solo com betume como aditivo. Segundo o DNIT (2006), estes solos são definidos como:

- Solo-cimento: mistura compactada de cimento Portland, solo e água; esta mistura deverá atender a certas exigências de densidade, durabilidade e resistência, obtendo como resultado um produto duro, cimentado, de elevada rigidez à flexão. O teor de cimento geralmente é da ordem de 6% a 10%.
- Solo melhorado com cimento: é obtido perante a adição de pequenas quantias de cimento (2% a 4%), aspirando principalmente a modificação do solo referente a sua plasticidade e sensibilidade à água, sem cimentação exagerada, são considerados flexíveis.

- Solo-cal: mistura de solo, cal e água e por vezes, cinza volante, uma pozolana artificial. A proporção de cal mais comum é de 5% a 6%, e o processo de estabilização ocorre: por modificação do solo, em relação a plasticidade e sensibilidade a água; por carbonatação, que é uma fraca cimentação; por pozolanização, que é uma forte cimentação.
- Quando pela natureza do solo, pela proporção de cal ou uso de cinza volante, prevalecem os dois últimos efeitos citados, obtêm-se a mistura solo-cal consideradas semi - rígidas
- Solo melhorado com cal: DNIT não determina os teores de cal utilizados e as características do solo, mas segundo Azevêdo (2010), denomina-se solo melhorado com cal, quando se pretende melhorar apenas algumas propriedades consideradas prejudiciais, que no caso da pavimentação são: elevada plasticidade, umidade intensa e expansibilidade.

### 2.3.1 Cal

Segundo a NBR 11172 (ABNT, 1990), a cal é um aglomerante composto principalmente de óxido de cálcio ou óxido de cálcio existente naturalmente com o óxido de magnésio, hidratados ou não. De acordo com Marques (2006), a cal virgem ou hidratada é um aglomerante obtido como resultado da calcinação de rochas calcárias (calcários ou dolomitos) a uma temperatura inferior à do início de fusão do material.

A matéria prima que dá origem aos produtos à base de cal, é a pedra calcária, constituída quase que unicamente por carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e por outros componentes em frações variáveis. Para que a cal aérea produzida seja de boa qualidade, é essencial que o calcário seja o mais puro possível, isto é, deve possuir uma alta concentração de carbonato de cálcio. Algumas impurezas como a sílica e os óxidos de ferro e de alumínio, acompanham os carbonatos em maior ou menor grau, na composição das rochas calcárias. Nestas rochas, o carbonato de cálcio é, constantemente, substituído em alguma proporção pelo carbonato de magnésio, que não é considerado uma impureza (COUTINHO, 2006).

A cal mais utilizada na pavimentação rodoviária, é a cal hidratada, devido as facilidades em seu uso, substituindo a cal virgem, pois embora ela tenha menor custo e contenha maior teor de óxidos de cálcio e magnésio, sua aplicação requer muitos cuidados com a segurança dos trabalhadores. Em países como Brasil e EUA, a utilização da cal hidratada é predominante, sendo que a cal viva é mais comumente usada na Europa (AZEVEDO, 2010).

A NBR 7175 (ABNT, 2003) classifica a cal em 3 categorias, são elas: CH-I, CH-II e CH-III. Vale ressaltar que antes da reforma da NBR em 1992, só existia a cal comum (CH-II), porém com o desenvolvimento da tecnologia, houve necessidade e requisição pelos consumidores de um produto mais puro, que cumprisse sua finalidade de forma mais aprimorada.

### **2.3.2 Solo-cal**

A concepção de estabilização dos solos por meio de reações químicas entre partículas do solo, materiais incorporados e a água dos vazios é similar tanto para o cimento quanto para a cal. No entanto, os efeitos da estabilização com cal são alcançados mais rapidamente do que os da estabilização com cimento (CRISTELO, 2001).

De acordo com Guimarães (2002), o método solo-cal é baseado na reação entre os componentes do solo, a cal e os elementos presentes no meio-ambiente, de maneira que a relação entre eles, é configurada através das reações químicas, físicas e físico-químicas que acontecem durante todo o processo de estabilização do solo.

Para a execução de uma mistura solo-cal para melhoramento do solo, é preciso encontrar o teor mais apropriado para o contexto e depois definir as propriedades da mistura e as suas mudanças ao longo do tempo (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

O teor ótimo estará vinculado ao propósito do material estabilizado, visto que há diversos teores, que poderão ser escolhidos conforme as propriedades que se pretende alcançar. Estas podem ter como finalidade a redução da plasticidade e o aumento da trabalhabilidade ou efeitos na resistência da mistura (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

O teor a ser utilizado na estabilização, deverá ser entre 1 a 10%, todavia cada caso deverá ser estudado. O uso em quantidades superiores não é necessário e econômico, porém não é recomendado utilizar menos que 3%, pois mesmo que se tenha alcançado as mudanças desejadas em laboratório, as condições de mistura em campo sempre são mais desfavoráveis (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

A proporção de cal altera certas características do solo. Joaquim (2017) fez um estudo com um solo classificado como argila-areno-siltosa. Ele executa um tratamento com cal e realiza variações dos teores deste aditivo que recebeu frações de 2%, 4%, 6% e 8%. Foi observado que o solo obteve massas específicas menor que o solo natural e que iam se tornando cada vez menores conforme ia aumentando a fração de cal. Foi notado pelo autor que a umidade ótima também se alterava. Quanto maior era o teor de cal, maior era a umidade ótima.

Segundo Guimarães (2002), a cal hidratada ou virgem influencia na estabilização de um solo de acordo com seus teores de magnésio e óxido de cálcio. De acordo com Nôbrega (1981), os íons dessas substâncias são a causa da modificação no comportamento dos argilominerais existentes no solo. No entanto, a autora enfatiza que cada solo reage de forma única para cada tipo de cal empregada e que a escolha e aplicação não pode ser arbitrária (ARAÚJO, 2009).

Assim que a cal é adicionada ao solo, há uma modificação de suas características através de uma combinação da superfície das partículas argilominerais com dupla camada e as trocas catiônicas no meio hidratado, que sofrem alteração pelos íons de cálcio existentes na cal (Rezende, 2017, apud Bell, 2017).

Segundo Lima (1981 apud COSTA, 2005) esta troca catiônica ocorre, pois a superfície das partículas estão carregadas negativamente e são neutralizadas por íons  $\text{Na}^+$  ou o  $\text{K}^+$ , que podem ser substituídos por outros íons positivos, mas quando são substituídos pelo  $\text{Ca}^+$  ou  $\text{Mg}^+$ , as partículas se tornam mais favoráveis a floculação. Quando a carga elétrica dos argilominerais é alterada, outras partículas tendem a ser atraídas para formar flocos. Como resultado, há uma aproximação das partículas finas do solo, tornando-as aglomeradas.

Segundo Santos (2012), a resistência de um solo tratado com cal aumenta, conforme se eleva a porcentagem deste aditivo. Este aumento está estreitamente relacionado ao tempo de cura da mistura e a temperatura apresentada durante o processo. Sendo assim, de acordo com Cristelo (2001), recomenda-se que seja utilizado no mínimo 5% de cal, mesmo que uma fração inferior alcance a resistência necessária.

De acordo com Alcântara (2010), a cal não possui literatura com tempo definido para mistura, mas que é de conhecimento geral que há uma reação excessivamente rápida (troca de íons e floculação) que fornece ganho de resistência imediato. No entanto, para que o tráfego possa ser liberado sobre a camada estabilizada, a resistência considerada satisfatória somente é alcançada entre 3 e 7 dias.

O solo apresenta inúmeras características e propriedades que interferem em sua reatividade com a cal. Dentre elas, podem ser mencionadas: o pH do solo, presença de carbonatos e/ou sulfatos, o teor de matéria orgânica, a relação sílica/ alumínio, o grau de intemperismo, a presença exagerada de sódio permutável e o ferro extraível (MALLELA, QUINTUS & SMITH, 2004).

Segundo Lovato (2004), a existência de matéria orgânica exerce influência sobre o processo de estabilização, desacelerando as reações e produzindo pequenos ganhos de

resistência. Alguns autores confirmam que solos com teor de material orgânico superior a 1%, não reagem à estabilização (ARAÚJO, 2009).

Em relação a existência de sulfatos no solo, Lovato (2004) declara que isto pode prejudicar as reações solo-cal. O autor afirma que o nível de deterioração relacionados aos sulfatos estará sujeito a inúmeros fatores e não somente do teor sulfato solúvel, devem ser levados em conta a temperatura, umidade, pH, disponibilidade de outros íons e o grau de carbonatação (ARAÚJO, 2009).

Como visto, para uma estabilização bem sucedida, o solo é um item crucial para se obter um bom resultado. A classificação de solos mais usualmente utilizada, que considera principalmente o tamanho dos grãos, foi criada pelo *Highway Research*, atual *Transportation Research Board*, que os divide em granulares (tipos A1, A2 e A3) e finos (A4, A5, A6 e A7) (AZÊVEDO, 2010).

Estudos realizados em laboratório têm demonstrado, notoriamente, que a cal possui eficácia em solos argilosos e expansivos. Portanto, os solos mais reativos, de maneira geral, são os seixos argilosos, as argilas siltosas e as argilas puras. Todos os solos que se classificam como A5, A6 e A7 e vários solos A-2-6 e A-2-7 são em sua maioria susceptíveis à estabilização com cal. Quando a caolinita é o argilomineral componente da fração fina do solo, a reação com a cal procede de forma demorada, sobretudo se a fração argilosa for composta majoritariamente por óxidos e hidróxidos de ferro, caso em que a reação poderá até mesmo ser anulada. Todavia, caso estejam presentes na parcela fina os minerais aluminosos (óxidos e hidróxidos de alumínio), que são facilmente encontrados nos solos ferralíticos da África, América do Sul e seus semelhantes do Sudeste Asiático, a reatividade com a cal é elevada, o que torna nestes casos a estabilização extremamente satisfatória (GUIMARÃES, 1971).

Ressalta-se que sempre haverá reação da cal, seja com qualquer tipo de solo com ganhos na qualidade da combinação, desde que ele contenha porção fina correspondente à fração argilosa em sua composição e este ganho será mais eficiente quanto maior for a fração argilosa, para uma mesma quantidade de cal e um mesmo tipo de argilo-mineral presente nesta porção de argila (AZÊVEDO, 2010).

Contudo somente a fração de argila não garante a obtenção de determinado resultado na estabilização. Segundo Nobrega (1985), dois solos que possuem a mesma porcentagem de argila, podem apresentar diferentes comportamentos em função do argilo-mineral predominante, o que revela que a composição mineral do solo, sua origem, são elementos fundamentais para o êxito da mistura sol-cal.

A mistura solo-cal deve demonstrar resistência apropriada, para compor bases e sub-bases de pavimentos, e conservar em condições de umidade, visto que se deseja obter uma elevação da resistência e uma compactação na umidade ótima depois da pulverização de mistura da cal (COELHO, 2009). A Figura 7, apresenta o processo de pulverização da cal sobre o solo, para posterior execução do solo-cal.

**Figura 7 - Solo-cal.**



**Fonte: (COELHO, 2009)**

### **2.3.3 Cimento**

De acordo com a NBR 11172(ABNT, 1990), o cimento é um aglomerante hidráulico, formado em geral por silicatos e/ou aluminatos de cálcio. Será dada ênfase ao cimento Portland, que é o mais utilizado nos processos de estabilização de solo e na construção civil.

O cimento Portland comum é um aglomerante hidráulico, gerado pela moagem do clínquer, composto sumariamente por silicatos de cálcio hidráulicos, com aditivos de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

Existem diversos tipos de cimento Portland, sendo classificados basicamente em 5 categorias: CP-I, CP-II, CP-III, CP-IV e CP-V. Estão apresentados de maneira mais detalhada na Tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de cimento.

Componentes				Componentes (% em massa)			
Denominação técnica	Denominação comercial	Sigla	Classe (MPa)	Clínquer mais sulfato de cálcio	Escória granulada de alto forno	Material pozolânico	Material carbonático
CP comum	CP comum	CP I	25	100	-	-	-
	CP comum mais adição	CP I-S	32	99-95	1-15		
			40				
CP composto	CP composto com escória	CP II-E	25	94-56	6-34	-	0-10
	CP composto com pozolana	CP II-Z	32	94-76	-	6-14	0-10
	CP composto com <i>filler</i>	CP II-F	40	94-20	-	-	6-10
CP de alto-forno	CP de alto-forno	CP III	25/32/40	65-25	35-70	-	0-5
CP Pozolânico	CP pozolânico	CP IV	25/32	85-45	-	15-50	0-5
CP de alta resistência inicial	CP de alta resistência inicial	CP V-ARI	Mínimo 34 MPa aos 7 dias	100-95	-	-	0-5

Fonte: (PINHEIRO; CRIVELARO, 2016).

Na Tabela 1 consta a denominação técnica, a nomenclatura usada comercialmente, a sigla, a classe.

### 2.3.4 Solo-cimento

O solo-cimento é determinado pelo *American Concrete Institute* – ACI (2009) como uma mistura de solo e quantidades definidas de água e cimento, compactada para uma elevada densidade. A estabilização de solos com cimento Portland pode ocorrer de duas formas divergentes, que dependerá do objetivo desejado. Como já mencionando anteriormente, casos em que se pretende enrijecer significativamente o solo, aplicam-se percentuais em massa, geralmente superiores a 5% e denomina-se solo-cimento (DNER, 1997f). Em circunstâncias em que seja necessária uma melhoria parcial das propriedades, especialmente trabalhabilidade

associada com certa elevação da capacidade de suporte, aplicam-se baixos percentuais, da ordem de 3%, denominando-se solo melhorado com cimento (DNER, 1997e)

As propriedades dos solos estabilizados com cimento dependerão de várias condições que interferem diretamente no resultado final da mistura. De acordo com a literatura (ACI 230, 1990; CRUZ, 2004; FOPPA, 2005), os fatores influentes são:

- Tipo de solo;
- Compactação;
- Proporção e circunstância da mistura;
- Tempo de cura;
- Presença de aditivos.

Cada uma dessas razões afeta de maneiras distintas o comportamento das misturas solo-cimento.

A estabilização de solos com cimento, pode ser utilizada para a maioria dos solos, no entanto solos com matéria orgânica superior a 2%, são considerados inadmissíveis para estabilização, assim com as argilas altamente plásticas. De acordo com a ACI (2009), solos granulares são os melhores para serem estabilizados com cimento. Eles se misturam mais facilmente do que os solos finos e resultam em solo-cimento mais barato, porque necessitam de uma menor quantidade de cimento. Solos que contêm entre 5 e 35% de finos passantes na peneira de número 200 (75  $\mu$  m) produzem um solo-cimento mais econômico. Inúmeros solos com elevada fração de finos e baixa plasticidade, foram estabilizados com sucesso e com baixo custo. Solos silvestres não plásticos com 60 a 70% de finos foram estabilizados, em campo, com apenas 9% de cimento e obtiveram um excelente desempenho.

Solos de partículas finas necessitam de maior quantidade de cimento para se obter um endurecimento adequado, sendo que argilas são mais difíceis de se executar uma mistura satisfatória. A presença de finos, não será sempre prejudicial, visto que alguns finos não plásticos podem trazer resultados positivos. Em areias ou pedregulhos uniformemente graduados, finos não plásticos, incluindo cinzas volantes, poeira de forno cimento e outros, servem para preencher os vazios do solo, propiciando uma estrutura mais densa e estável (ACI, 2009). Solos com pH menor que 5,5, geralmente também são inaceitáveis para estabilização com cimento (ROBBINS & MUELLER, 1960).

Em princípio, os solos tratados com cimento possuem algumas propriedades melhoradas como redução da coesão (plasticidade), redução da compressibilidade, diminuição

da expansão do volume e aumento da resistência mecânica (LIMA *et al*, 1993; MAKUSA, 2013).

Segundo Costa (2005), com o acréscimo de aglomerantes como a cal e cimento, processa-se uma cimentação nos grãos do solo que gera uma redução no índice de vazios e como consequência, o volume de água absorvida pelos solos é bastante diminuído, reduzindo o fenômeno de expansão.

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal, na especificação E243-1971, determina os seguintes pressupostos, que os solos devem atender para que possam ser estabilizados com cimento:

- Solos desprovidos de raízes, capim e elementos prejudiciais ao cimento Portland;
- Teor máximo em matéria orgânica de 2% e sulfatos de 0,2%;
- Limite de liquidez igual ou inferior a 45%;
- Porcentagem igual ou superior respectivamente a 80 e 40%, de solo passado na peneira ASTM (*American Society for Testing and Materials*) de 50mm e número 4 (4,75mm).

No Quadro 2, estão relacionados os principais fatores que afetam o comportamento da mistura solo-cimento, segundo Dias (2012).

**Quadro 2 - Fatores que afetam o comportamento das misturas de solo-cimento.**

Fatores		Adequado	Não adequado
Tipo de solo		Areia, siltes e argilas	Solos orgânicos e argilas altamente plásticas
Proporção e condições de mistura	Cimento	Até 16%	Mais do que 16%
	Água	Valor do teor em água perto do ótimo	Valor inferior a hidratação do cimento ou muito superior ao teor em água ótimo
Compactação		Valor aproximado do peso volumétrico seco máximo	Menor que 95% do valor que se pretende
Tempo de cura		Mínimo 3, ideal 7 dias	Inferior a 3 dias
Presença de aditivos		Cloreto de cálcio, cloreto de sódio e hidróxido de sódio	Qualquer material prejudicial ao cimento (sulfatos)

Fonte: (DIAS, 2012)

Segundo o ACI (2009), as porcentagens de cimento variam dependendo das propriedades almejadas e do tipo de solo. O teor de cimento pode variar de 2% a 16% em peso seco do solo. Conforme a fração argilosa do solo aumenta, a quantidade requerida de cimento também aumenta. Segundo Pereira (1970 *apud* CRUZ, 2004) as porcentagens usualmente

utilizadas nas misturas variam entre 5% e 15% em relação a massa de solo seco, sendo utilizadas não somente em sub-bases como em camadas de base de rodovias. O aumento de cimento provoca resistências mais elevadas, porém não se recomenda quantidades de cimento muito altas, visto que poderá ocasionar transtornos tanto técnicos quanto econômicos. Um teor elevado de cimento conduzirá a retrações em excesso que fraturam a mistura em blocos de dimensões médias.

O acréscimo de pequenas quantidades de cimento (até 2%), mudará as propriedades do solo, enquanto maiores volumes irão alterar drasticamente as suas características (INGLÊS & METCALF, 1972). De acordo com estes autores, as características do solo se alteram com o aumento da quantidade de cimento, como: aumento da capacidade de carga, a durabilidade durante ciclos de molhagem e secagem se eleva em geral, a permeabilidade diminui, contudo aumenta em solos argilosos, a predisposição a retração aumenta em solos granulares e a propensão a expansão de solos argilosos reduzirá (DIAS, 2012).

Dias (2012) realizou ensaios com solo-cimento, utilizando solo silto-argiloso e cimento com proporção de 8% e 12%, relativo ao solo seco. Foram moldados corpos de prova com quantidades estabelecidas de cimento, água e solo de modo a ser obtido valores de umidade ótima. Foi notado que o solo obteve grandes melhorias nas características mecânicas comparado ao solo sem qualquer tratamento. Quanto maior a quantidade de cimento, maior a resistência alcançada e os maiores ganhos de resistência ocorreram durante os 7 dias de cura iniciais., enquanto Azevedo (2010) afirma que o cimento irá obter bons resultados aos 28 dias de cura

A adição de cimento ao solo também provoca alterações em suas características de massa específica e umidade ótima, assim como a cal. No estudo realizado por Joaquim (2017) com o solo classificado como argila areno-siltosa, utilizando teores de cimento de 2,5%, 3%, 4% e 5%, foi notado que o solo-cimento não apresentou um comportamento padrão na umidade ótima, pois conforme o aumento do teor de cimento, ora a umidade se elevava e ora reduzia. Em compensação a massa específica máxima seca foi aumentando à medida que o teor de cimento aumentava. Entretanto, o mesmo autor faz outra análise com um solo classificado como areia grossa à fina argilo-siltosa, A massa específica reduziu com teor de 2,5% e foi aumentando a partir de 3% conforme a proporção de cimento adicionado. A umidade ótima reduziu no solo-cimento com teor de 2,5%, mas a partir de 3% foi obtendo umidades ótimas cada vez menores, conforme o aumento da fração de cimento, apresentando um comportamento oposto do solo com cal.

A base solo-cimento tem apresentado bastante resistência e durabilidade, desde que respeitados alguns requisitos como: espalhamento e compactação, seja minimizada a

decorrência exagerada de trincas por retração, mistura bem dosada, sejam respeitados os prazos máximos de mistura e o subleito tenha capacidade para suportar a compactação do solo-cimento de forma eficiente. O tráfego poderá ser liberado, geralmente, após 14 dias de cura. O solo-cimento também tem sido bem sucedido como sub-base de pavimentos de concreto de cimento Portland. O módulo de resiliência de solo-cimento varia de 2000 Mpa até pouco acima de 10000 Mpa, enquanto a resistência a tração varia entre 0,6 a 2,0 Mpa, dependendo do tipo de solo e da quantidade de cimento utilizado (BERNUCCI *et al.*, 2006). Na Figura 8, é apresentado o lançamento e mistura do cimento.

**Figura 8 - Solo-cimento.**



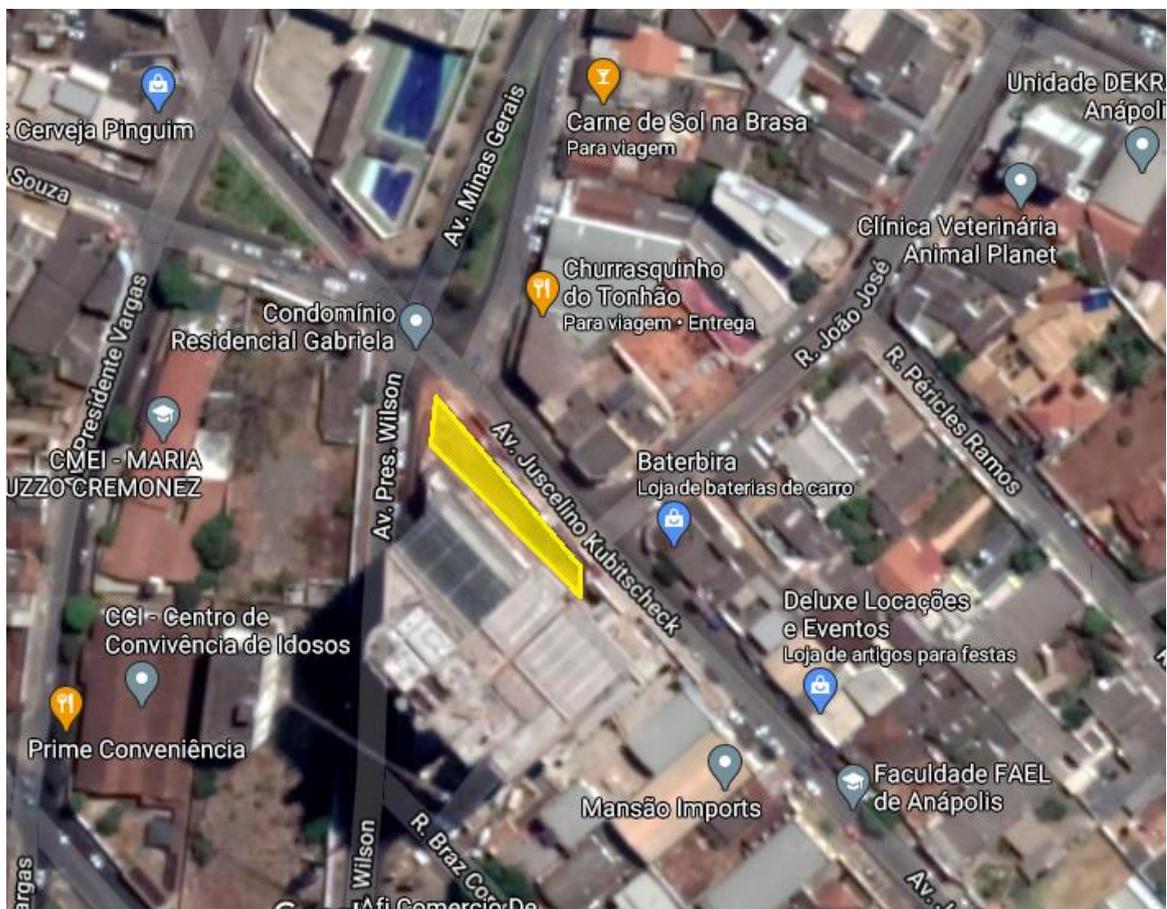
**Fonte: NOBREGA PIMENTA (2020)**

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 SOLO E LOCAL

A amostra de solo coletado para análise foi retirada da cidade de Anápolis, em área localizada na Avenida Juscelino Kubitschek, Bairro Jundiáí, cuja coordenada é em latitude  $16^{\circ}20'04.3''S$  e longitude  $048^{\circ}56'57.1''W$ , conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Local da retirada do solo.



Fonte: Google Maps (2020).

A profundidade de escavação foi de aproximadamente 9 metros e foram retirados mais de 1000 caminhões de solo. Para a realização dos ensaios, foi coletado ao todo cerca de 120 kg. As divisões de massa para cada ensaio podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade solo para cada ensaio

	Natural	Adição da cal	Adição do Cimento
Granulometria	130 g	-	-
Compactação, CBR e Expansão	30 kg	45 kg	45 kg
Massa específica	150 g		

Fonte: Aatoria própria (2020)

Ao fazer a análise tátil-visual do solo (Figura 10), foi constatado que o solo apresentava alta concentração de finos e cor avermelhada, livre de matéria orgânica e não possuía coesão dos grãos em estado seco. Ao ser umedecido, apresentava elevada coesão e plasticidade, sendo facilmente moldável com as mãos.

Figura 10 - Solo natural.



Fonte: Aatoria própria (2020)

Os ensaios de peneiramento, sedimentação e compactação, executados com o solo natural, foram realizados no Centro Tecnológico do Centro Universitário de Anápolis – UniEvangélica (Figura 11). Os ensaios de expansão e CBR, efetuados com o solo com os aditivos, foram realizados no Laboratório Técnico e Engenharia LTDA (LTEC), localizado no município de Goiânia.

**Figura 11 - Centro Tecnológico**



**Fonte: Autoria própria (2020)**

A massa total de solo somada com cada um dos aditivos foi de 50 kg, necessários para a realização dos ensaios. Segundo COELHO; TORGAL; JALALI, (2009)., a proporção apropriada de cal seria de 1% a 10% e de acordo com ACI (2009), a proporção de cimento efetiva seria de 2% a 16%. Neste trabalho, o estudo se consiste na análise da mesma proporção em massa de 10% de aditivo em relação a massa total do solo. Foi determinada esta proporção para que seja efetuada melhor comparação do custo-benefício dos dois aditivos estudados. Portanto, foram 5 kg de cal hidratada, do tipo CH-III, misturados a 45 kg de solo e 5 kg de cimento Portland do tipo CP II F-32, a 45 kg de solo. Cal e cimento foram adicionados à amostra no Centro Tecnológico e transportados ao LTEC para a realização dos ensaios.

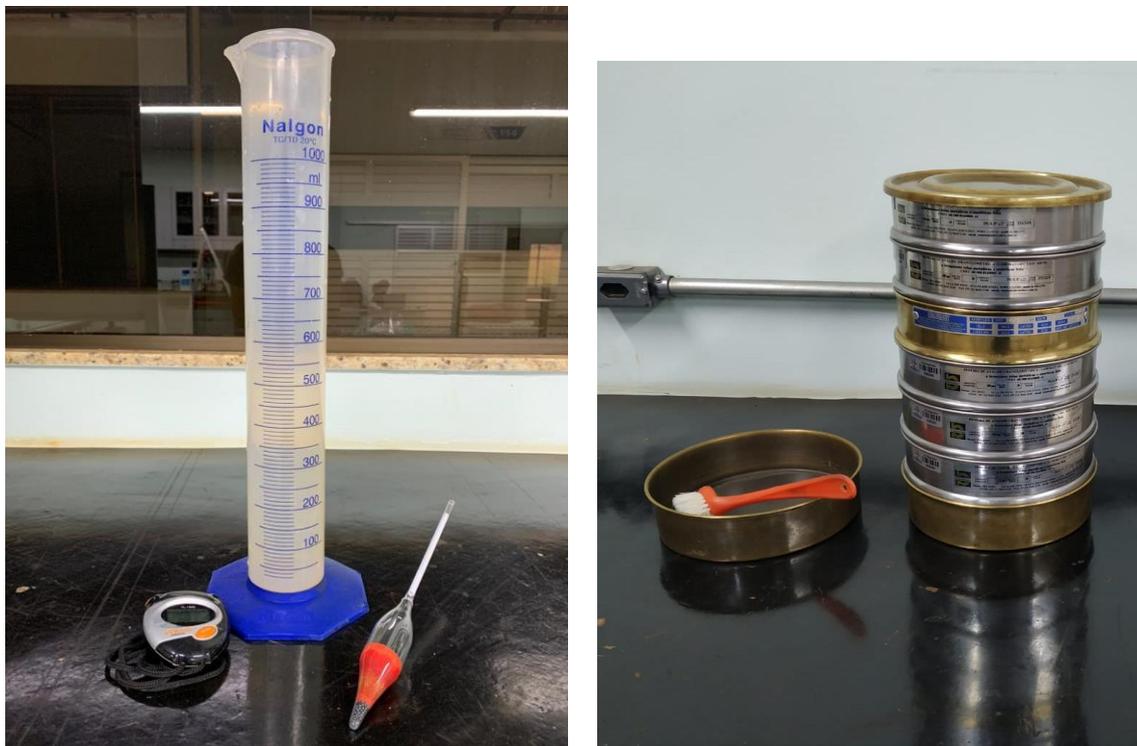
## 3.2 NORMAS

### 3.2.1 Granulometria

A distribuição granulométrica é apontada como essencial para a classificação dos solos com características minerais, desde argilas a matações. A nomenclatura é atribuída a intervalos ou sub frações granulométricas. No entanto, a maior parte dos solos é composta por frações de diversas granulometrias, sendo descrito como uma fração principal, uma fração secundária e caso seja necessário, uma fração terciária (BARNES, 2016).

A NBR 7181 (ABNT, 2017) é a norma que estabelece o método para análise granulométrica, executada por peneiramento ou por uma associação de sedimentação e peneiramento. O método do peneiramento separa partículas de até 0,075 mm, que é composta por pedregulhos, areias grossas, médias e finas. Enquanto a sedimentação separa grãos menores que 0,075 mm, sendo que esta fração é composta por siltes e argilas. O ensaio se consiste na realização de três etapas: sedimentação, peneiramento fino e peneiramento grosso, sendo que no peneiramento grosso é utilizada até a peneira N° 10, no peneiramento fino, a peneira N° 40 até a N° 200, e a sedimentação a partir da peneira N° 200 (Figura 12).

**Figura 12 - Equipamentos para sedimentação.**



**Fonte: Autoria própria (2020)**

Conforme estabelecido pela NBR 6457 (ABNT, 2016), a amostra de solo deve secar ao ar e ser passada na peneira N° 10 (2,0 mm). O material retido na peneira é lavado para que o material fino aderido seja retirado, e posteriormente secado em estufa com temperatura de 105°C a 110°C. Este material será utilizado no peneiramento grosso. Após ser retirado da estufa, o solo é passado nas peneiras de 50, 38, 25, 19, 9,5 e 4,8 mm e cada fração retida acumulada deve ser pesada, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Cálculo peneiramento grosso e fino.

Malha	Diâmetro (mm)	Massa retida (g)	Massa retida acumulada	% Passante
#10	2,000			
#16	1,200			
#32	0,600			
#40	0,420			
#50	0,300			
#100	0,150			
#200	0,075			
Fundo				

Fonte: Autoria própria (2020)

A porcentagem de material passante nas peneiras é calculada pela Equação 1:

$$Q_g = \frac{M_s - M_i}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

$Q_g$  = Porcentagem de material passado em cada peneira;

$M_s$  = Massa total da amostra seca;

$M_i$  = Massa do material retido acumulado em cada peneira;

No ensaio de sedimentação e de peneiramento fino, em caso de solos argilosos, a NBR 7181 (ABNT, 2017) recomenda que sejam tomados 70 gramas do material passado na peneira de 2,0mm, mas quando for um solo arenoso, devem ser tomados 120 gramas. Esta amostra é condicionada em um béquer com 125 cm<sup>3</sup> de solução de hexametáfosfato de sódio, como defloculante, com concentração de 45,7 g do sal por 1000 cm<sup>3</sup> de solução. O béquer é agitado e posteriormente, mantido em repouso por no mínimo 12 horas.

O ensaio de sedimentação se baseia na Lei de Stokes (1850), em que é determinada uma relação entre o diâmetro da partícula e a sua velocidade de sedimentação em um meio fluido de viscosidade e meio específico conhecidos (CAPUTO, 2015). Desta maneira, quanto maior a partícula, mais rápida ela se depositará no fundo da proveta de ensaio.

O defloculante (Figura 13) possui a função de desagregação dos grãos, pois o solo em seu estado natural, possui em sua composição o ferro e hidróxido de ferro que aglutinam as

partículas, agindo como uma espécie de cola. Sem o uso desse componente para realizar a quebra da cimentação, a granulometria teria um resultado equivocados, visto que os grãos estariam agregados e sedimentariam mais rapidamente, apresentando, falsamente, uma curva com porcentagem de grãos com maiores diâmetros do que a realidade e como consequência seria classificada incorretamente (PINTO, 2006).

**Figura 13 – Hexametáfosfato de Sódio (defloculante).**



**Fonte: Autoria própria (2020)**

Após a preparação, o material é colocado em uma proveta de vidro e é adicionado água destilada até que atinja a marca de 1000 cm<sup>3</sup>. A mistura terá que ser agitada com o bastão de vidro para manter as partículas em suspensão. Depois da agitação, é inserido um densímetro e as leituras são realizadas aos tempos de sedimentação de 0,5, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8 e 24 horas após o início da sedimentação (Tabela 4).

Tabela 4 - Cálculo de sedimentação.

Tempo	Leitura do Densímetro (Ld)	Temperatura (°C)	Altura de queda (a)	Diâmetro (mm)	% Passante
30s					
1 min					
2 min					
4 min					
8 min					
15 min					
30 min					
1 hora					
2 horas					
4 horas					
8 horas					

Fonte: Autoria própria (2020).

A porcentagem de material em suspensão no momento da leitura do densímetro é calculada pela Equação 2:

$$Q_s = N \times \frac{\delta}{(\delta - \delta_d)} \times \frac{V\delta_c(L - L_d)}{\frac{M_h}{(100+h)} \times 100} \quad (2)$$

Onde:

$Q_s$  = porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro

$N$  = porcentagem de material que passa na peneira de 2,0 mm, calculado conforme Equação 1;

$\delta$  = massa específica dos grãos do solo, em g/cm<sup>3</sup>;

$\delta_d$  = massa específica do meio dispersor, à temperatura de ensaio, em g/cm<sup>3</sup>;

$V$  = volume da suspensão, em cm<sup>3</sup>;

$\delta_c$  = massa específica da água, à temperatura de calibração do densímetro (20°C), em g/cm<sup>3</sup>;

$L$  = leitura do densímetro na suspensão;

$L_d$  = leitura do densímetro no meio dispersor, na mesma temperatura da suspensão;

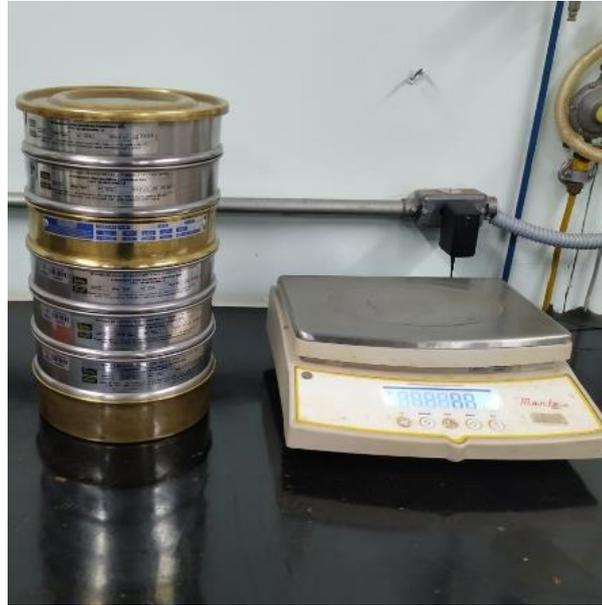
$M_h$  = massa do material úmido submetido à sedimentação, em g;

$h$  = umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,0 mm.

Posteriormente a última leitura, o material da proveta é vertido na peneira N° 200 para a realização do peneiramento fino. Todo o material retido na proveta, é lavado na peneira,

utilizando água potável. Este material é levado para a estufa para secagem e passado nas peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15 e 0,075 m. Conforme a figura 14 e em seguida a massa retida, em cada peneira, deve ser pesada.

**Figura 14 - Balança e peneiras finas.**



**Fonte: Autoria própria (2020)**

A porcentagem de material que passa nas peneiras deve ser calculada utilizando-se a Equação 03:

$$Q_f = \frac{M_h \times 100 - M_i \times (100 + h)}{M_h \times 100} \times N \quad (3)$$

Onde:

$Q_f$  = porcentagem de material passado em cada peneira;

$M_h$  = massa do material úmido submetido ao peneiramento fino ou à sedimentação;

$h$  = umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,0 mm;

$M_i$  = massa do material retido acumulado em cada peneira;

$N$  = porcentagem de material que passa na peneira de 2,0 mm, calculado conforme

Equação 1.

Com a conclusão do ensaio, é possível realizar a análise granulométrica, com a determinação do tamanho das partículas do solo e das proporções relativas em que se encontram, é representada, graficamente, por meio da curva granulométrica. Essa curva é

traçada por pontos, em que no eixo das abcissas são indicados os logaritmos das dimensões das partículas e no eixo das ordenadas as porcentagens em peso, de material que possui dimensão menor que a dimensão indicada (CAPUTO, 2009).

### 3.2.2 Compactação

A compactação é um processo mecânico ou manual, que por meio da aplicação repetitiva de uma carga ao solo, gera uma redução do seu volume, logo, uma redução do índice de vazios e uma elevação do peso seco. Esta diminuição do volume se deve, principalmente, à expulsão de ar dos vazios, não havendo considerável alteração no teor de água nem alteração do volume de sólidos durante a compactação (SANTOS, 2012).

Segundo Craig e Knappett (2014), o processo aumenta a massa específica de um solo, agrupando as partículas. De forma geral, quanto maior for o grau de compactação, maior será a resistência ao cisalhamento e menor será a compressibilidade do solo. O autor afirma que a massa específica seca após compactação dependerá de dois fatores: teor de umidade e da energia gerada pelo equipamento de compactação.

A NBR 7182 (ABNT, 2017) é a norma que regulamenta o ensaio de compactação, que é utilizado para determinar a relação entre a massa específica aparente seca e o teor de umidade de solos quando compactados. A norma classifica a energia de compactação em três categorias: normal, intermediária e modificada. Para a aplicação dessas energias, devem ser utilizados o soquete pequeno ou grande possuindo 2,5 kg e 4,5 kg, respectivamente. O número de golpes também é variável, dependendo da energia desejada, conforme Tabela 5.

**Tabela 5 - Energias de compactação.**

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

Fonte: NBR 7181 (ABNT,2017)

A NBR 6457 (ABNT, 2016) determina como o solo deverá ser preparado para a execução do ensaio de compactação. Para a realização deste trabalho, as amostras foram preparadas com secagem prévia até a umidade higroscópica e não houve reuso de material.

De acordo com a norma, a amostra é seca ao ar, até atingir a umidade higroscópica. A mistura deve estar homogênea e caso tenha torrões, são desmanchados, sem que ocorra quebra dos grãos. É preciso que a amostra passe integralmente na peneira de 4,8 mm e seja dividida em 5 partes, uma para cada corpo de prova.

Para a realização do ensaio, é utilizado um molde cilíndrico conforme Figura 15. em que o solo é compactado em 3 ou 5 camadas iguais, em que cada uma recebe um número de golpes, conforme determinado pela Tabela 5. O corpo de prova é pesado e de seu interior uma amostra é retirada e depositada em cápsula metálica e levado em estufa para determinação da umidade. Permanece em estufa, em um intervalo de 16 h a 24 h e após remoção da estufa, uma nova pesagem será executada.

**Figura 15 - Equipamentos para compactação.**



**Fonte: Autoria própria (2020)**

A massa específica aparente seca ( $\gamma_s$ ) é calculada pela seguinte Equação 4:

$$\gamma_s = \frac{P_h \times 100}{V(100 + h)} \quad (4)$$

Onde:

$\gamma_s$  = massa específica aparente seca, em g/cm<sup>3</sup>;  
 $P_h$  = peso úmido do solo compactado;  
 $V$  = volume útil do mole cilíndrico, em cm<sup>3</sup>; e  
 $h$  = teor de umidade do solo compactado, em %.

A NBR 7182 recomenda a determinação da curva de saturação, que é a relação entre a massa específica aparente seca e o teor de umidade, utilizando a Equação 5:

$$\gamma_s = \frac{S}{\frac{h}{\delta_a} + \frac{s}{\delta}} \quad (5)$$

Onde:

$\gamma_s$  = massa específica aparente seca, em g/cm<sup>3</sup>;  
 $S$  = grau de saturação, igual a 100%;  
 $h$  = teor de umidade, arbitrado na faixa de interesse, em %;  
 $\delta$  = massa específica dos grãos do solo em g/cm<sup>3</sup>, considerado igual a 2,65 g/cm<sup>3</sup>;  
 $\delta_a$  = massa específica da água em g/cm<sup>3</sup>, considerada igual a 1,00 g/cm<sup>3</sup>.

E assim, são obtidos 5 pontos ao final do ensaio. Dois pontos permanecem no ramo seco, um próximo a umidade ótima e dois no ramo úmido da curva de compactação.

### 3.2.3 Índice de suporte a califórnia (ISC)

O ensaio ISC foi desenvolvido pelo Departamento de Rodovias do Estado da Califórnia para verificar a resistência de subcamadas de pavimentos rodoviários. É um teste em que a capacidade de carga de um solo é comparada com a capacidade de uma brita graduada padrão (BGS), que é utilizada como referência. A resistência à penetração possui seu valor dado em porcentagem, desta forma, a brita graduada possui CBR de 100%.

No Brasil, conhecido também como Índice de Suporte Califórnia (ISC), o ensaio é regulamentado pela NBR 9895 (ABNT, 2016). O ensaio se consiste na realização de três etapas: moldagem do corpo de prova, expansão e penetração.

A moldagem do corpo de prova é realizada em consonância ao ensaio de compactação, sendo utilizado o cilindro grande. A norma determina que a energia aplicada é variável, pois deverão ser aplicados 12 golpes no caso de material de subleito, 26 ou 55 golpes, nos casos de

materiais de sub-base ou base, respectivamente. Do material excedente da moldagem, são retirados aproximadamente 100 g para determinação do teor de umidade. Geralmente são moldados 5 corpos de prova com teores de umidade diferentes.

Após a moldagem do corpo de prova, é realizada a etapa da expansão (Figura 16). Os discos espaçadores são retirados e a haste de expansão com os pesos anelares são acrescentadas. O conjunto é imerso em água por 96 horas, sendo realizadas leituras no extensômetro a cada 24 horas. Depois da última leitura, os corpos são retirados da imersão e deixados para escoar água por 15 minutos.

**Figura 16 - Tanque de imersão.**



**Fonte: Autoria própria (2020)**

É importante a realização deste ensaio, visto que solos muito expansíveis na presença de água geram problemas no pavimento, proporcionando ondulações e rupturas. Segundo o DNIT (2006), os valores de expansão dos materiais empregados no pavimento dependem da função estrutural exercida, conforme classificação:

- Subleito: Expansão  $< 2\%$
- Reforço do subleito: Expansão  $\leq 1\%$
- Sub-base: Expansão  $\leq 1\%$
- Base: Expansão  $\leq 0,5\%$

A expansão é calculada pela Equação 6:

$$E(\%) = \frac{\text{leitura final} - \text{leitura inicial (deflectômetro)}}{\text{altura inicial do corpo de prova}} \times 100 \quad (6)$$

A penetração é realizada em uma prensa e o corpo de prova é rompido por meio da penetração de um pistão cilíndrico com a velocidade de 1,27 mm/min (Figura 17). São registradas as pressões do pistão e os respectivos deslocamentos. Com os valores obtidos é traçada a curva da pressão aplicada pelo pistão versus penetração do pistão, mas para a determinação do Índice de Suporte Califórnia, é utilizado o maior dos valores obtidos nas penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm.

**Figura 17 - Prensa para determinação do ISC.**



**Fonte: Autoria própria (2020)**

O ISC é calculado conforme Equação 7:

$$ISC(\%) = \frac{\text{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{pressão padrão}} \times 100 \quad (7)$$

Os resultados dos ensaios dependem da granulometria dos solos, mas de acordo com o (DNIT, 2006), o material das camadas do pavimento terá seu CBR dependendo de sua função estrutural, conforme classificação:

- Subleito:  $ISC \geq 2\%$
- Reforço do subleito:  $ISC > ISC$  do subleito
- Sub-base:  $ISC \geq 20\%$
- Base:  $ISC \geq 80\%$

## 4 RESULTADOS

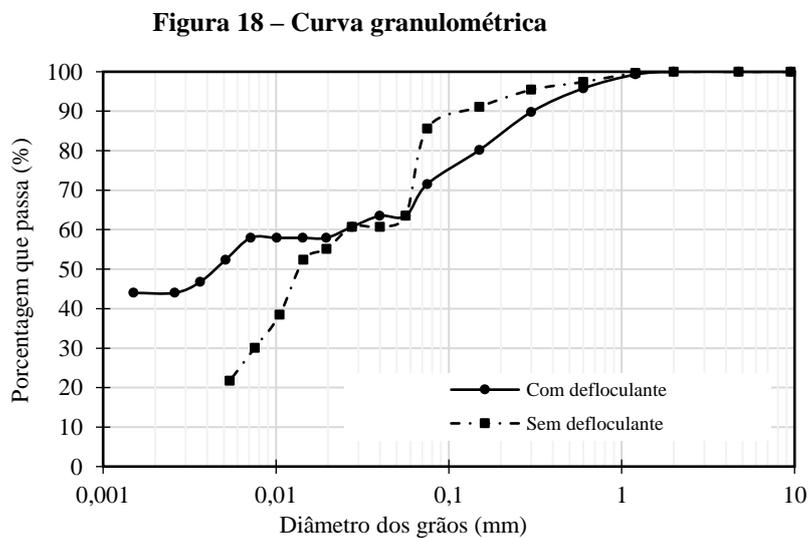
### 4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Todos os ensaios foram realizados conforme procedimentos pré-estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, determinados para cada ensaio. O solo foi preparado conforme NBR 6457 (ABNT, 2016). Peneiramento e sedimentação foram realizados conforme a NBR 7181 (ABNT, 2017). O ensaio de compactação, conforme NBR 7182 (ABNT, 2017) e ensaio de expansão e ISC de acordo com a NBR 9895 (ABNT, 2016).

#### 4.1.1 Ensaio granulométrico

Os ensaios de granulometria (peneiramento e sedimentação), descritos no Capítulo 3, foram realizados sem e com defloculante, no caso o hexametáfosfato de sódio. Não foi necessário realizar o peneiramento grosso, já que a amostra coletada em campo não possuía grãos grosseiros. Desta forma, pode-se inferir que o solo não possui em sua composição partículas maiores que 2 mm.

No peneiramento fino realizado sem defloculante, 85,58% do solo passou na peneira de 0,075 mm. Enquanto no ensaio com defloculante o material passante nessa mesma peneira foi de 71,53% demonstrando ser um solo com elevada fração de finos, corroborando com a análise tátil-visual realizada anteriormente.



Fonte: Autoria própria (2020).

A Figura 18 demonstra as curvas granulométricas obtidas a partir dos ensaios. Uma das curvas apresenta os ensaios executados com defloculante e a outra curva apresenta os mesmos ensaios executados sem defloculante. O eixo das abcissas demonstra a porcentagem passante e o eixo das ordenadas demonstra o diâmetro dos grãos em milímetros.

A partir da curva é possível fazer a classificação dos solos, conforme NBR 6502 (ABNT, 1995). Entretanto, observa-se a importância do hexametáfosfato de sódio recomendado pela ABNT para a realização do ensaio, visto que conforme elucidado no Capítulo 3, a ausência deste elemento pode ocasionar uma classificação errônea do solo. Na Tabela 6 está demonstrada a porcentagem de cada fração do solo do ensaio realizado sem defloculante, que recebeu a classificação de silte argilo arenoso por demonstrar possuir fração de silte na maior parte de sua composição.

**Tabela 6 - Sedimentação sem defloculante.**

<b>Variação dos grãos</b>	<b>Classificação</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
Maior que 2 mm	Pedregulho	0
Entre 2 mm e 0,06 mm	Areia	14,42
Entre 0,06 mm e 0,002 mm	Silte	63,86
Menor que 0,002 mm	Argila	21,72

**Fonte: Autoria própria (2020)**

A Tabela 7 apresenta a porcentagem de frações de solo mais próxima da realidade, dado que o ensaio foi executado com o uso de defloculante, consequentemente recebendo a classificação de argila areno siltosa.

**Tabela 7 - Sedimentação com defloculante.**

<b>Variação dos grãos</b>	<b>Classificação</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
Maior que 2 mm	Pedregulho	0
Entre 2 mm e 0,6 mm	Areia	28,47
Entre 0,6 mm e 0,002 mm	Silte	27,54
Menor que 0,002 mm	Argila	44,00

**Fonte: Autoria própria (2020)**

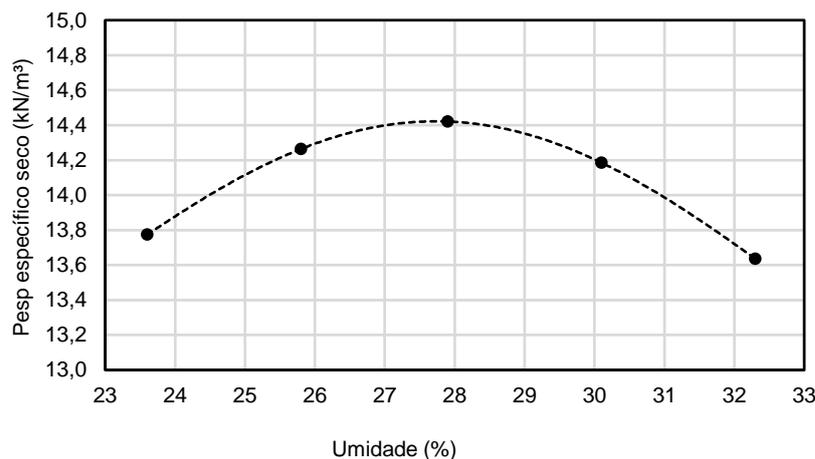
Nota-se pela característica da curva granulométrica, que o solo com defloculante não possui boa graduação, pois a curva forma um patamar que indica uma fração irrisória de siltes com tamanhos entre 0,006 mm e 0,6mm. Desta forma, é um solo de granulometria aberta, visto a ausência de siltes nos diâmetros mencionados.

#### 4.1.2 Compactação

O ensaio de compactação do solo com os aditivos (cal e cimento) foi realizado no dia 15 de outubro de 2020. A energia de compactação aplicada para a moldagem dos corpos de prova, foi a energia normal, conforme visto na Tabela 4, utilizando o soquete grande, 5 camadas e 12 golpes. Foram moldados 5 corpos de prova em que houve variação de umidade em torno de 2%, onde dois corpos de prova com a umidade no ramo seco, dois no ramo úmido e um corpo de prova próximo da umidade ótima.

Para a amostra de solo com cimento, a massa total utilizada foi de 6 kg, sendo que a massa total seca é equivalente a 5,53 kg dessa massa. A média do teor de umidade higroscópica dessa amostra foi de 8,4%, a umidade ótima obtida foi de 27,7% e peso específico de 14,41 kN/m<sup>3</sup>. Na Figura 19 é demonstrado o gráfico de compactação, em que o eixo das abcissas apresenta o peso específico seco e o eixo das ordenadas apresenta a umidade (%).

**Figura 19 - Gráfico compactação mistura solo – cimento.**

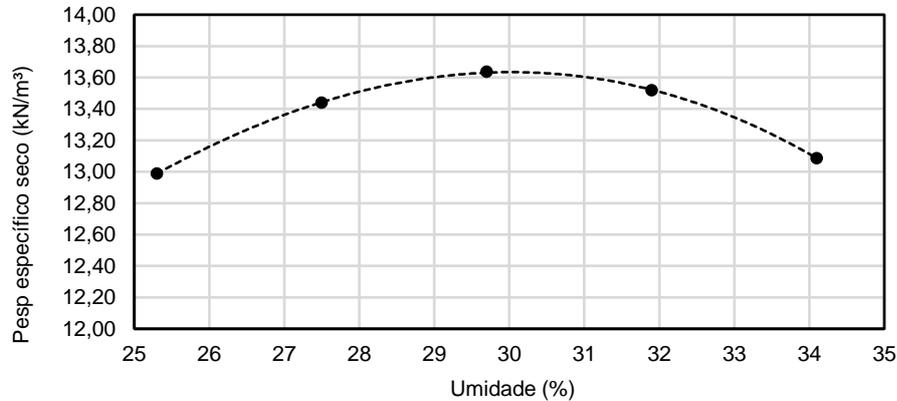


**Fonte: Autoria Própria (2020)**

Enquanto isso a Figura 20 apresenta o resultado da amostra de solo com cal. A massa total empregada foi de 6 kg em que a massa seca corresponde a 5,46 kg do total. O teor de

umidade higroscópica foi de 9,9%, a umidade ótima encontrada foi de 30% e peso específico de 13,62 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 20 – Gráfico compactação mistura solo-cal.



Fonte: Autoria própria (2020)

O solo-cal apresentou uma massa específica seca inferior ao solo-cimento. Isto, provavelmente, se deve ao fato de que a cal hidratada possui massa específica inferior a massa específica do cimento. Enquanto o cimento CP II-F-32 possui massa específica de 3,11 g/cm<sup>3</sup>, a cal hidratada CH-III possui massa específica de 2,21 g/cm<sup>3</sup>. Já o solo natural possui massa específica dos grãos 2,65 g/cm<sup>3</sup>.

Os resultados obtidos na realização do ensaio do solo com cimento, em cada corpo de prova, estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da compactação solo-cimento.

Corpos de prova	1	2	3	4	5
Cilindro + solo úmido(g)	8640	9215	8815	9070	8560
Massa do cilindro(g)	5025	5405	4895	5240	4756
Solo úmido(g)	3615	3810	3920	3830	3804
Volume cilindro (cm <sup>3</sup> )	2083	2083	2084	2036	2068
Massa específica natural (g/cm <sup>3</sup> )	1,74	1,83	1,88	1,88	1,84
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,40	1,45	1,47	1,45	1,39
Água adicionada (ml)	840	960	1080	1200	1320
Umidade (%)	23,6	25,8	27,9	30,1	32,30

Fonte: Autoria própria (2020)

Os resultados obtidos com cada corpo de prova de solo-cal estão demonstrados na Tabela 9.

**Tabela 9 - Resultados da compactação solo-cal.**

<b>MOLDAGEM NBR 7182-2016</b>					
Corpos de prova	1	2	3	4	5
Massa cilindro + solo úmido(g)	8354	8989	8625	8475	8456
Massa do cilindro(g)	5012	5375	4865	4775	4756
Solo úmido(g)	3342	3614	3760	3700	3700
Volume cilindro(cm <sup>3</sup> )	2015	2069	2085	2036	2068
Massa específica natural(g/cm <sup>3</sup> )	1,659	1,747	1,803	1,817	1,789
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,324	1,370	1,390	1,378	1,334
Água adicionada (ml)	840	960	1080	1200	1320
Umidade (%)	25,3	27,5	29,7	31,9	34,10

**Fonte: Autoria própria (2020)**

Com relação a umidade ótima percebe-se que o solo-cal obteve maior valor em comparação ao solo-cimento. Por outro lado, quando se compara a massa específica seca máxima, o solo-cimento obteve maior valor. Esses resultados são concomitantes com o observado por Joaquim (2017) que analisou um solo natural argiloso e observou que o solo que recebeu cal como aditivo apresentou valores menores de massa específica. Entretanto, o solo que recebeu cimento apresentou massas específicas maiores conforme o aumento da proporção de cimento.

Lovato (2004) e Joaquim (2017) relatam uma redução da massa específica máxima e um aumento da umidade ótima em solos tratados com cal. Quando a cal é adicionada ao solo, ocorre o processo de floculação, que é responsável pela elevação da quantidade e tamanho dos vazios. No processo de compactação, a estrutura floculada com alto índice de vazios é resistente a carga aplicada, resultando em uma massa específica menor. Além disto, é necessário um teor de água maior para preenchimento dos vazios, resultando em uma maior umidade ótima (SIVAPULLAIAH et al., 1998 apud CUNHA, 2016).

### 4.1.3 Expansão

Este ensaio foi efetuado com as amostras de solo com cal e cimento. Foram utilizados três corpos de prova de cada amostra de solo, com as leituras sendo executadas a cada 24 horas no extensômetro, em conformidade com a NBR 9895 (ABNT, 2017). Os corpos de prova selecionados para o ensaio foram aqueles com a umidade mais próxima da ótima, sendo um do ramo seco, um do ramo ótimo e outro do ramo úmido.

A primeira leitura foi realizada no dia 15 de outubro de 2020 às 10 horas e a leitura de encerramento no dia 19 de outubro de 2020 também às 10 horas. Os resultados de expansão dos corpos de prova com solo-cimento dos cilindros 3 e 4, sendo um da umidade ótima e outro do ramo úmido, respectivamente, obteve-se a expansão de 0,07%, enquanto o cilindro 2 (ramo seco) mostrou expansão de 0,01%. Os resultados obtidos do ensaio do solo-cimento encontram-se detalhados na Tabela 10:

**Tabela 10 - Expansão solo-cimento.**

Data	2	3	4
15/10/2020	1,00	1,00	1,01
19/10/2020	1,01	1,08	1,09
Expansão do solo (%)	0,01	0,07	0,07

**Fonte: Autoria própria (2020)**

O resultado de expansão para o solo-cimento será adotado o valor 0,07%, referente ao corpo de prova 3, que é o mais próximo da umidade ótima. O solo-cimento atendeu as exigências dos limites de expansibilidade da DNIT (2006), levando-se em consideração apenas esta característica, o solo poderia ser aplicável em qualquer camada do pavimento.

Os resultados do ensaio realizado com o solo-cal encontram-se na Tabela 11:

**Tabela 11 - Expansão solo – cal.**

Data	2	3	4
15/10/2020	1,00	1,00	1,01
19/10/2020	1,00	1,02	1,03
Expansão do solo (%)	0	0,02	0,02

**Fonte: Autoria própria**

Os corpos de prova de solo-cal demonstraram baixíssima expansibilidade para a aplicação em camadas do pavimento, sendo observado que no corpo de prova 2 não houve expansão, enquanto nos corpos de prova 3 e 4 houve expansão de 0,02%. A expansão está associada a presença de água, portanto é natural que os corpos de prova do ramo seco, tanto da cal quanto do cimento, tenham demonstrado menor expansão, pois quanto mais água, maior será a expansão.

Verifica-se também que o solo com cal apresentou menor expansão do que o solo com cimento, o que Cunha (2016) explica como sendo em razão de que solos tratados com cal tendem a reduzir as mudanças volumétricas devido à flocculação das partículas.

Para se obter resultados mais conclusivos a respeito da expansibilidade, seriam necessários estudos dos minerais presentes na fração fina do solo, uma vez que eles exercem grande influência no comportamento expansivo.

Ressalta-se que os corpos de prova não tiveram tempo de cura antes da realização do ensaio, fator que deve ser levado em consideração e que pode também alterar os resultados. O que Cunha (2005) explica na teoria, quanto maior o tempo de cura, menores seriam os valores de expansão do solo, em virtude da ação cimentante do aglomerante, diminuindo o processo expansivo.

#### 4.1.4 Índice de Suporte a Califórnia (ISC)

Após o ensaio de expansão, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de Índice de Suporte Califórnia. Como definido pela NBR 9895 (ABNT, 2016), o ISC é determinado pelo maior valor obtido dentre as penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm. Para efeitos de análise de aplicabilidade em camada de pavimento, será adotado o valor de ISC para o corpo de prova da umidade ótima. Isto se deve ao fato de que o solo na umidade ótima apresenta maior estabilidade.

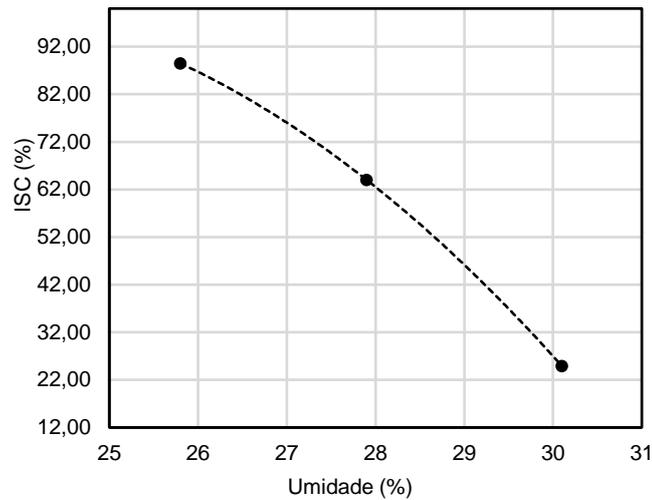
Tabela 12 - ISC solo-cimento.

PENETRAÇÃO NBR 9895-2017										
Tempo(min )	Penetração (mm)	RAMO SECO			RAMO ÓTIMO			RAMO ÚMIDO		
		Leitura	Pressão Corrigida (Kgf/cm <sup>2</sup> )	ISC (%)	Leitura	Pressão corrigida (kgf/cm <sup>2</sup> )	ISC (%)	Leitura	Pressão corrigida (kgf/cm <sup>2</sup> )	ISC (%)
0,5	0,63	305	29,1		110	10,5		55	5,3	
1	1,27	555	53		238	22,7		108	10,3	
1,5	1,9	600	57,2		360	34,3		146	13,9	
2	2,54	640	61,1	<b>88,5</b>	455	43,4	<b>64</b>	180	17,2	<b>24,9</b>
3	3,81	719	68,6		584	55,7		220	21	
4	5,08	813	77,6	<b>74,9</b>	700	66,8	<b>65</b>	262	25	<b>24,2</b>
5	6,35	870	83		780	74,4		305	29,1	
6	7,62	939	89,6		850	81,1		430	41	

Fonte: Autoria própria (2020)

Os resultados do solo-cimento encontram-se detalhados na Tabela 12 supracitada. Observa-se que o ISC obtido nas penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm no ramo ótimo, foram de 64% e 65%, respectivamente, mas o valor encontrado para a umidade ótima foi de 68,1%. Como já era esperado, os valores de ISC do corpo de prova do ramo seco foram bem maiores e o do ramo úmido obteve os piores resultados, dado que solos secos são mais resistentes e solos muito úmidos apresentam resistências bem menores. Na Figura 21 está representado o gráfico obtido a partir do ensaio.

Figura 21 - ISC para solo – cimento.



Fonte: Autoria própria (2020)

Embora o valor adotado seja o da umidade ótima, é importante o conhecimento do comportamento do solo nas melhores condições, quando se apresenta seco e nas piores condições, quando se apresenta saturado.

Atendendo a determinação do DNIT (2006), o solo-cimento poderia ser utilizado como subleito, já que possui ISC maior que 2% e como sub-base, pois possui ISC maior que 20%, mas não poderia ser utilizado como base em que é necessário um ISC de no mínimo 80%.

Na Tabela 13, encontram-se os valores encontrados para o ensaio realizado com solo-cal.

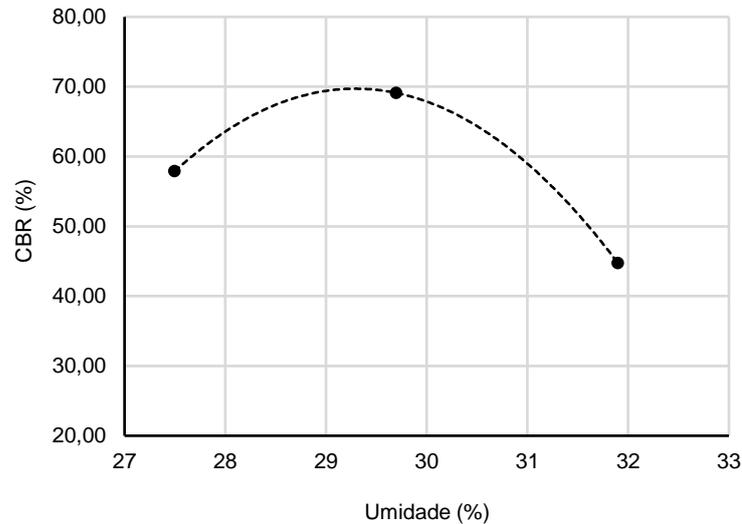
Tabela 13 – ISC solo-cal.

PENETRAÇÃO NBR 9895-2017										
Tempo(min )	Penetraçã o (mm)	RAMO SECO			RAMO ÓTIMO			RAMO ÚMIDO		
		Leitur a	Pressão Corrigid a (Kgf/cm <sup>2</sup> )	ISC (%)	Leitur a	Pressão corrigida (kgf/cm <sup>2</sup> )	ISC (%)	Leitur a	Pressão corrigida (kgf/cm <sup>2</sup> )	ISC (%)
0,5	0,63	140	13,4		215	20,5		90	8,6	
1	1,27	327	31,2		370	35,3		190	18,1	
1,5	1,9	380	36,3		446	42,6		268	25,6	
2	2,54	413	39,4	<b>57,9</b>	500	47,7	<b>69,1</b>	320	30,5	<b>44,7</b>
3	3,81	464	44,3		573	54,7		403	38,5	
4	5,08	513	48,9	<b>47,7</b>	634	60,5	<b>58,4</b>	459	43,8	<b>42,5</b>
5	6,35	550	52,5		690	65,8		509	48,6	
6	7,62	585	55,8		725	69,2		558	53,2	

Fonte: Autoria própria (2020)

Verifica-se que o ISC encontrado no ramo ótimo para as penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm foram de 69,1% e 58,4%, respectivamente, mas o valor encontrado para a umidade ótima foi de 68%. A Figura 22 apresenta o gráfico do ensaio com solo-cal.

**Figura 22 - ISC para solo – cal.**



**Fonte: Autorial própria (2020)**

O solo-cal apresentou um comportamento bastante atípico. Embora o corpo de prova do ramo úmido tenha apresentado um resultado esperado, com valores de ISC menores, o corpo de prova do ramo seco desenvolveu menores valores de ISC que o ramo ótimo, o que não era previsto, já que solos com menores teores de água tendem a possuir maiores resistências.

De acordo com os critérios do DNIT (2006), o solo-cal, assim como o solo-cimento, poderia ser utilizado para subleito e sub-base, porém não poderia ser utilizado para base por não ter alcançado o mínimo de 80% de ISC. Para ser utilizado como reforço do subleito seria necessário conhecimento do ISC do subleito e caso fosse maior, poderia ser utilizado.

Observa-se que o solo-cal e solo-cimento obtiveram praticamente o mesmo resultado de ISC. Esperava-se que o solo-cimento apresentasse maior resistência, porém deve ser considerado o fato de que nenhuma das amostras teve tempo de cura após a compactação, o que pode interferir na resistência.

Outro fato importante é que solos granulares apresentam melhores resultados ao serem estabilizados com cimento, não que isto impeça a estabilização em solos finos, mas será necessária uma quantidade maior deste aglomerante para isso. O solo estudado se trata de um

solo argila areia-siltosa, ou seja, possui elevada fração de finos que podem interferir na resistência do solo com cimento. Já solos finos são melhores estabilizados utilizando-se a cal como estabilizante.

#### 4.2 COMPARAÇÃO DE PREÇO DOS ADITIVOS

Para verificar qual aglomerante apresentava um valor mais econômico, foram realizadas consultas nas principais lojas de materiais de construção, em suas plataformas online. Como era esperado, houve baixa variação de preço dentre as lojas pesquisadas, portanto foi obtido um valor médio de cada aditivo.

Foi verificado que o valor de um saco de cimento CP II-F-32 de 50 kg, que foi o cimento utilizado na mistura solo-cal, estava custando em média R\$24,00, constata-se que o valor unitário está custando R\$0,48/kg. Enquanto um saco de cal do tipo CH-III de 20 kg estava custando em média R\$11,00, verifica-se que o valor unitário é R\$0,55/kg, desta forma observa-se que os dois aditivos apresentaram valores próximos, portanto levando-se em consideração apenas o preço de cada aglomerante, nota-se que o cimento demonstra maior vantagem, visto que apresenta menor preço unitário que a cal.

## 5 CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido avaliou os resultados da mistura solo-cal e solo-cimento para aplicação em camadas de base, sub-base e reforço do subleito de pavimentos, realizando a verificação do custo benefício entre os dois aditivos. A proporção de aglomerante para as duas misturas foi de 10% em relação a massa total do solo, visto que diversos autores já haviam realizado estudos anteriores com os dois aditivos e para facilitar a comparação no quesito custo.

Por meio da análise e discussão dos resultados pode-se inferir que com relação ao ensaio de granulometria foi verificado que solo natural apresenta elevada fração de finos, que se evidenciam com o uso do defloculante.

Já no ensaio de compactação, o solo-cal obteve menor massa específica máxima seca do que o solo-cimento, devido à flocculação que ocorre na mistura solo-cal que proporciona maior elevação dos vazios e como consequência ocasiona redução da massa específica. Este efeito também propicia o aumento da umidade ótima do solo-cal, que é maior do que a umidade ótima do solo-cimento.

Para o ensaio de expansão, o solo-cal demonstrou ser menos expansivo do que o solo-cimento, efeito também proporcionado pelo fenômeno da flocculação, o que é uma grande vantagem, uma vez que a expansão causa inúmeros problemas na pavimentação. Ressalta-se que para obter resultados mais conclusivos, seria necessário verificar a composição de minerais presentes no solo, pois alguns desses elementos geram influência na expansibilidade.

Solo-cimento e solo-cal obtiveram desempenhos semelhantes no ensaio de ISC. Embora fosse esperado que o solo-cimento apresentasse desempenho superior, os resultados revelaram que os dois solos desenvolveram praticamente a mesma resistência. No entanto, um fator importante para que o solo atinja boas resistências é o tempo de cura. Este efeito pode alterar o resultado final da resistência dos dois solos. Constata-se que os dois solos não poderiam ser utilizados como base do pavimento, pois não alcançaram o desempenho mínimo imposto pelo DNIT, mas poderiam ser utilizados em sub-base e em outras camadas distintas.

Outro fato relevante, é que o solo estudado possui granulometria fina e é altamente argiloso, característica que pode afetar o desempenho do cimento, visto que este aglomerante apresenta melhores comportamentos quando adicionado a solos arenosos, embora o cimento também obtenha bons resultados em solos argilosos, sendo necessário somente um aumento na fração de cimento.

Na comparação de custo, foi constatado nas pesquisas que o cimento apresentou valor unitário inferior que a cal, no entanto destaca-se que a diferença foi de apenas R\$0,07/kg, desta forma observa-se que os dois aditivos apresentaram valores muito próximos.

A partir da análise de todos os resultados, percebe-se que os dois aglomerantes obtiveram desempenhos semelhantes, especialmente na propriedade de resistência, que é de grande relevância para solos que exercerão funções de base e sub-base de pavimentos.

Diante dos fatos expostos, pode-se concluir que o custo-benefício de ambos os aditivos é equivalente. Como critério de desempate pode-se decidir pela escolha da cal, pois possui comportamento menos expansivo na mistura solo-cal, ressaltando-se que há pouca diferença em relação ao solo-cimento ou pode-se optar pelo cimento CP II-F-32 por apresentar um preço um pouco mais atrativo e por ter alcançado bom desempenho, mesmo se tratando de um solo altamente argiloso, característica que à primeira vista o eliminaria como alternativa de aditivo estabilizante. Sendo assim, os dois aglomerantes proporcionam melhorias significativas no solo, trazendo vantagens que propiciam maior durabilidade das rodovias brasileiras.

## 5.1 SUGESTÕES FUTURAS

- Realizar ensaios de compactação, expansão e ISC com o solo nativo e comparar com o solo com aditivo;
- Alteração da proporção de cal e cimento para verificação das alterações ocasionadas no solo;
- Mudança no tempo de cura para observar se há alteração em características como expansão e ISC.
- Estudo dos minerais que compõem o solo, visto que exercem alterações significativas no desempenho do solo.

## REFERÊNCIAS

ABCP. **Associação Brasileira de Cimento Portland**. 2020. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/>. Acesso em: 17 out. 2020.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 230.1R-09**: Relatório sobre so. Instituto Americano de Concreto 38800 Country Club Drive Farmington Hills, 2009.

ARAUJO, Arielton Fonteles. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do estado do Ceará**. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa em Mestrado de Engenharia de Transporte, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11172**: Aglomerantes de origem mineral - Terminologia. Rio de Janeiro, 1990. 5 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – análise Granulométrica Rio de Janeiro, 2017. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016 Versão corrigida: 2020. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016. 14 p.

AZÊVEDO, André Luis C. de. **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. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BALBO, T. JOSÉ. Pavimentação Asfáltica. 3ª ed. Oficina de Textos, 2016.

BARNES, Graham **Mecânica dos solos: princípios e práticas**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

BATISTA, C.f. **Ensaios Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis**: vol1. 2. ed. Porto Alegre-rs: Globo, 1976.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básico para engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2010. 116 p.

BRITO, Lais Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, Edição 6, Ano 2, v. 1, p. 425-438, set. 2017. Disponível Em: <https://www.Nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/estabilizacao-de-solos>. Acesso em: 29 maio 2020

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: volume 1**. 7.ed. - Rio de Janeiro : LTC, 2015.

CNT CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Transporte Rodoviário: Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?**-Brasília, CNT, 2017

COELHO, Ana Zulmira Gomes; TORRAL, F. Pacheco; JALALI, Said. **A cal na construção**. Guimaraes: Guimarães, 2009

CONCREPAV. **Concreto para pavimento rígido**. 2020. Disponível em: [concrepav.com.br/concreto-pavimento-rigido](http://concrepav.com.br/concreto-pavimento-rigido). Acesso em: 05 nov. 2020.

COUTINHO, J.S (2006) **Materiais de Construção 2. Ligantes e caldas**. Departamento de engenharia civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

COSTA, Otoniel Pereira da. **Avaliação de expansão, contração e resistência à compressão simples de barreiras selantes produzidas com solo laterítico estabilizado quimicamente**. 2005. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Sao Paulo, 2005.

CRAIG, Robert F.; KNAPPETT, J. A.. **Craig mecânica dos solos**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2014. Tradução de Amir Elias Abdalla Kurban.

CRISTELO, Nuno. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. 2001. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Minho, Portugal, 2001.

CRUZ, Maria de Lurdes Santos da. **Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento**. 2004. 240 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil Estruturas, Geotecnia e Fundações, Universidade de Minho, Guimaraes, 2004.

CUNHA, Guilherme Henrique Rodrigues Itiberê da. **Estudo de compressibilidade de um solo da formação guabirotuba estabilizado com cal**. 2016. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Acadêmico de Construção Civil Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016

DIAS, João José da Fonseca Marques Simões. **Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas**. 2012. 117 f. Dissertação (Mestrado) -

Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa-portugal, 2012.

DNER DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ES 304/97**: Pavimentação de solo melhorado com cimento, 1997f

DNER DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ES305/97**: Pavimentação - base de solo-cimento. Rio de Janeiro, 1997e

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE (org.). **Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes**. Brasília, 2017. 10 v.

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE. **DNIT 139/2010-ES**: Pavimento-sub-base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE. **DNIT 141/2010 - ES**: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTES. **IPR719**: Manual de Pavimentacao. 3 ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE. **IPR 794**: Manual de pavimentos rigidos. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005.

GOIAS. GOINFRA. (org.). **Governo de Goiás vai investir R\$ 360 milhões para recuperar e entregar 18 rodovias estaduais até 202**. Disponível em: <<http://www.goinfra.go.gov.br/noticias/governo-de-goias-vai-investir-r-360-milhoes-pararecuperar-e-en>>. Acesso em: 03 nov. 2020.

HAMZAH, M. - Conventional Methods for Highway Soil Stabilization, a thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering of the University of Strathclyde, Glasgow, 1983.

HOMY QUIMICA (org.). **Como o estabilizante de solo aumenta a durabilidade das estradas**. 2018. Disponível em: [http://blog.homyquimica.com.br/como-o-estabilizante-de-solo-aumenta-a-durabilidade-das-estradas/?gclid=Cj0KCQjwu6fzBRC6ARIsAJUwa2SBDLGtk5ghyfBxctOg82Yov-Jmrm\\_JWhyQIMHzFS8NKsgamNSj5XAaAmWcEALw\\_wcB](http://blog.homyquimica.com.br/como-o-estabilizante-de-solo-aumenta-a-durabilidade-das-estradas/?gclid=Cj0KCQjwu6fzBRC6ARIsAJUwa2SBDLGtk5ghyfBxctOg82Yov-Jmrm_JWhyQIMHzFS8NKsgamNSj5XAaAmWcEALw_wcB). Acesso em: 03 nov. 2020.

INGLES, O. and Metcalf, J. B. – *Soil stabilization – Principles and practice*, Butterworths, Australia, 1972.

JOAQUIM, Amaro Gabriel. **Estudo de dois solos tropicais melhorados com cimento ou cal para emprego em camadas superiores de estradas não-pavimentadas**. 2017. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017

KNAPPETT, J. A. Craig. **Mecânica dos solos**; tradução Amir Elias Abdalla Kurban. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

LITTLE, D. N.. **Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime**, Published by Kendall/Hunt Publishing Company, 1995;

LITTLE, D. N. Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates. Volume 1: Summary of Findings. Prepared for the National Lime Association, 1999.

LAUFER, Berthold. **Chinese Clay Figures, Part 1: Prolegomena on the History of Defensive Armor**. Whitefish: Editora: Kessinger Publishing, 1967.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado a pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

MAKUSA, G. P. Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review. Sweden: Lulea University of Technology, 2013.

MALLELA, J.; QUINTUS, P. E. H. V.; SMITH, K. L. **Consideration of Lime- Stabilized Layers in Mechanistic-Empirical Pavement Design**. Prepared for The National Lime Association. 2004.

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

MEDINA, J. **Apostila de estabilização de solos**. Rio de Janeiro: Coppe/rj, 1987.

MOUSAVI, S.E., KARAMVAND, A. **Assessment of strength development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand**. Journal of Traffic and Transportation Engineering, (English Edition), JTTE: 142, 2017, doi: 10.1016/j.jtte.2017.02.002.

NOBREGA PIMENTA (Minas Gerais). **Nobrega Pimenta Construtora**. Disponível em: <http://nobregapimenta.com.br/>. Acesso em: 05 nov. 2020.

PINHEIRO, Antonio Carlos da Fonseca Bragança; CRIVELARO, Marcos. **Materiais de Construção**. 2. ed. Sao Paulo: Érica, 2016.

PINTO, Carlos de Sousa **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PUGLIESI, Nataly. **CIMENTO: DIFERENTES TIPOS E APLICAÇÕES**. 2019. Disponível em: <https://abcp.org.br/imprensa/artigos/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/>. Acesso em: 30 mar. 2020.

ROCHA, Mirella Talitha; REZENDE, Lilian Ribeiro de. **Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação**. 2017. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/issue/view/896>. Acesso em: 05 nov. 2020.

SANTOS, M. N. **Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra**. PUC - Relatório de iniciação científica, Rio de Janeiro, 2012.

SATEL. **Aluguel de máquina**. 2020. Disponível em: <https://www.satel.com.br/>. Acesso em: 05 nov. 2020.

SOUZA, Murillo Lopes de. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. 3ed. Rio de Janeiro, IPR, 1981. (IPR. Publ.667)

SUPRIMENTO, Manutenção e. **O que é pavimento flexível**. 2018. Disponível em: <https://www.manutencaoesuprimentos.com.br/o-que-e-pavimento-flexivel/#gsc.tab=0>. Acesso em: 05 nov. 2020.

VERDÉLIO, Andréia. **Governo destina R\$ 2 bi para manutenção e pavimentação de rodovias**. 2019. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2019-04/governo-destina-r-2-bi-para-manutencao-e-pavimentacao-de-rodovias>. Acesso em: 12 maio 2020.

VILLIBOR, Douglas Fadul. **Estabilização granulométrica ou mecânica**. São Carlos-SP: Gráfica Eesc-usp, 1982.