



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**VINÍCIUS NUNES WANDERLEY MONTEIRO**

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ACERCA DA UTILIZAÇÃO DE ESTABILIZANTES  
QUÍMICOS PARA MELHORAMENTO DE SOLOS EM CAMADAS DE  
PAVIMENTAÇÃO**

**POMBAL – PB**

**2021**

Vinícius Nunes Wanderley Monteiro

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ACERCA DA UTILIZAÇÃO DE ESTABILIZANTES  
QUÍMICOS PARA MELHORAMENTO DE SOLOS EM CAMADAS DE  
PAVIMENTAÇÃO.

Monografia apresentada à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Me. Valter Ferreira de Sousa Neto

M775r Monteiro, Vinícius Nunes Wanderley.

Revisão bibliográfica acerca da utilização de estabilizantes químicos para melhoramento de solos em camadas de pavimentação. / Vinícius Nunes Wanderley Monteiro. - Pombal, 2021.

65 f. : il.

Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2021.

"Orientação: Prof. Me. Valter Ferreira de Sousa Neto".

Referências.

1. Pavimentação. 2. Solo - estabilizante químico. 3. Pavimentação - solo - camadas. 4. Vias de baixo tráfego. 5. Vias de tráfego - melhoramento. I. Sousa Neto, Valter Ferreira de. II. Título.

CDU 625.8(043)

Vinícius Nunes Wanderley Monteiro

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ACERCA DA UTILIZAÇÃO DE ESTABILIZANTES  
QUÍMICOS PARA MELHORAMENTO DE SOLOS EM CAMADAS DE  
PAVIMENTAÇÃO.

Monografia apresentada à Unidade Acadêmica  
de Ciências e Tecnologia Ambiental da  
Universidade Federal de Campina Grande,  
como parte dos requisitos necessários para  
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovada em: 14 / 05 / 2021.

BANCA EXAMINADORA



---

Msc. Valter Ferreira de Sousa Neto

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)



---

Msc. Eduardo Morais de Medeiros

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)



---

Msc. Eduardo Antônio Tenório Guimarães

Centro Universitário Maurício de Nassau (UNINASSAU)

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais José Cláudio de Sousa Wanderley Monteiro e Francisca Maria Nunes Monteiro pelo incentivo, suporte e presença em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, Professor Me. Valter Ferreira de Sousa Neto, pela dedicação, disposição, apoio e todo conhecimento compartilhado para que o desenvolvimento deste trabalho se tornasse possível.

A todo o corpo docente da Universidade Federal de Campina Grande, campus Pombal, por todos os ensinamentos repassados ao longo da graduação.

A todos os demais funcionários da UFCG, campus Pombal, que trabalham para manter o funcionamento deste campus.

Aos meus amigos e familiares que estiveram comigo ao longo dessa etapa que foi a graduação, onde me incentivaram e buscaram me dar suporte.

Aos amigos que fiz neste curso, onde partilhamos diversos momentos em conjunto, sempre nos apoiando e partilhando conhecimentos e experiências.

## RESUMO

No Brasil, principalmente em regiões não metropolitanas, moradores e produtores locais sofrem com a falta de infraestrutura de vias com baixo volume de tráfego, entretanto, essas vias são de extrema importância para produtores agrícolas, por exemplo, que escoam por elas seus produtos até as grandes cidades. Em meio às adversidades, o mercado da construção civil buscou encontrar soluções que minimizem o custo de obras rodoviárias, atualmente existem diversos materiais e métodos alternativos, como estabilizantes químicos, capazes de oferecer uma melhor qualidade a via para o transporte de pessoas e produtos, aumentando o conforto, a segurança e a velocidade de transporte. Para a produção desse trabalho, foi realizado um levantamento bibliográfico por meio de consulta eletrônica, levando em consideração documentos como artigos científicos, livros, teses e dissertações acerca do tema, esse trabalho visa reunir conhecimentos sobre o uso e aplicação de métodos de estabilização química de solos. Foi observado como cada tipo de estabilizante age nas propriedades físicas do solo, em quais propriedades eles são mais, ou menos, efetivos. Por fim, pôde-se verificar diversos resultados que são de senso comum entre as diferentes pesquisas realizadas pelos autores, identificar quais fatores são importantes para se avaliar a efetividade dos métodos de estabilização química pesquisados, bem como analisar que o mesmo estabilizante químico não age da mesma forma dependendo da classificação do solo, tendo assim cada método de estabilização química diferentes tipos de solos propícios à sua aplicação.

**Palavras-chave:** Vias de tráfego; transporte; estabilização química.

## **ABSTRACT**

In Brazil, especially on non-metropolitan regions, residents and local producers suffer due to lack of infrastructure on low volume traffic roads, however, these roads are extremely important to the agricultural producers, for instance, when transporting their products toward the big cities. In face of the adversities, the civil construction business searched for solution which minimized the expenses from road works, currently there are many materials and alternative methods, such as chemical stabilizers capable of providing better road quality for the transport of people and products, increasing comfort, safety and transportation speed. In order to produce this piece of work, a bibliographical survey was carried out through the use of electronic consultation, taking in consideration documents such as scientific articles, books, theses and essays regarding the theme, this work strives for reuniting knowledge on the use and application of soil chemical stabilization methods. It was evidenced how each type of stabilizer acts on the soil's physical attributes, in what attributes they are more, or less, effective. In conclusion, many results that are a common view among the numerous researches conducted by the authors could be verified, which factors are important to measure the effectiveness of the chemical stabilization methods researched, as well as analyzing that the same chemical stabilizer doesn't act in the same way depending on the soil classification, and thus each method of chemical stabilization has different kinds of soil favorable to its application.

**Key-words:** Traffic roads; transport; chemical stabilization.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Estrutura de pavimento. ....	14
<b>Figura 2</b> - Resultados da distribuição granulométrica do solo natural e tratado com 5, 9 e 13% de cal. ....	27
<b>Figura 3</b> - Variação do pH em relação ao aumento da porcentagem de cal adicionada ao solo. ....	28
<b>Figura 4</b> - Variação dos limites de Atterberg em relação ao aumento da porcentagem de cal adicionada ao solo. ....	28
<b>Figura 5</b> - Variação da resistência a compressão simples em relação ao aumento da porcentagem de cal adicionada ao solo. ....	29
<b>Figura 6</b> - Taxa de crescimento de resistência à compressão simples com aumento da porcentagem de cal aplicada em diferentes tipos de solo. ....	30
<b>Figura 7</b> - Processo de produção da emulsão asfáltica. ....	32



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Condições e restrições gerais para os materiais em suas respectivas camadas. ....	15
<b>Tabela 2</b> - Faixas granulométricas de materiais para base. ....	16
<b>Tabela 3</b> - Parâmetros de resistência em tensões efetivas do solo e solo-cal com 5, 9 e 13 % de cal e tempos de cura estudados (7 a 180 dias de cura). ....	31
<b>Tabela 4</b> - Classificação das emulsões asfálticas. ....	33
<b>Tabela 5</b> - Recomendações de solos para estabilização com betume. ....	35
<b>Tabela 6</b> - Locais onde foram aplicadas cinzas com outros materiais na pavimentação. ....	40
<b>Tabela 7</b> - Aumento do RCS em misturas de solo-cimento. ....	44
<b>Tabela 8</b> - Aumento do RTCD e misturas de solo-cimento. ....	44
<b>Tabela 9</b> - Aumento do ISC em misturas de solo-cimento. ....	45
<b>Tabela 10</b> - Aumento do RCS para misturas de solo-cal. ....	47
<b>Tabela 11</b> - Aumento da RTCD das misturas de solo-cal. ....	47
<b>Tabela 12</b> - Aumento da RTCD em misturas de solo-betume. ....	48
<b>Tabela 13</b> - Aumento da RTCD para misturas de solo-betume. ....	49
<b>Tabela 14</b> - Aumento da RCS para misturas de solo-betume. ....	50
<b>Tabela 15</b> - Aumento da RCS para misturas de solo-betume. ....	50
<b>Tabela 16</b> - Aumento no MR das misturas de solo-betume. ....	51
<b>Tabela 17</b> - Aumento do ISC para misturas de solo-cinza de carvão e solo-cinza e cal. ....	53
<b>Tabela 18</b> - Diminuição da expansão das misturas de solo-cinza de carvão, solo-cal e solo-cinza e cal. ....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários de Transporte
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
CA	Concreto asfáltico denso
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CPA	Camada porosa de atrito
CNT	Confederação Nacional de Transportes
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
EA	Emulsão Asfáltica
HRB	Highway Research Board
ISC	Índice de Suporte Califórnia
MR	Módulo de Resiliência
PMQ	Pré-misturado a quente
RCS	Resistência à Compressão Simples
RL	Ruptura Lenta
RM	Ruptura Média
RR	Ruptura Rápida
RTCD	Resistência a Tração por Compressão Diametral
SMA	Stone Matrix Asphalt
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 OBJETIVO GERAL.....	13
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
2.1 PAVIMENTAÇÃO .....	14
2.1.1 ESTRUTURA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS .....	14
2.1.2 MATERIAIS PRESENTES NAS CAMADAS DO PAVIMENTO .....	15
2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	16
2.2.1 ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA .....	18
2.2.2 ESTABILIZAÇÃO FÍSICA .....	19
2.2.3 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA .....	19
2.3 ALTERAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO SOLO .....	20
2.3.1 ESTABILIDADE VOLUMÉTRICA .....	20
2.3.2 AUMENTO DA RESISTÊNCIA .....	21
2.3.3 PERMEABILIDADE .....	22
2.3.4 DURABILIDADE.....	23
2.4 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO POR MÉTODOS QUÍMICOS .....	23
2.4.1 SOLO-CIMENTO .....	24
2.4.2 SOLO-CAL .....	25
2.4.3 SOLO-BETUME.....	31
2.4.3.1 EMULSÃO ASFÁLTICA.....	31
2.4.3.2 RUPTURA DAS EMULSÕES ASFÁLTICAS .....	32
2.4.3.3 SOLOS PROPÍCIOS A ESTABILIZAÇÃO COM BETUME.....	34
2.4.4 SOLO-CINZA DE CARVÃO .....	36
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>42</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>43</b>

4.1 RESULTADOS DE PESQUISAS EXPERIMENTAIS REALIZADAS COM MISTURA DE SOLO-CIMENTO.....	43
4.2 RESULTADOS DE PESQUISAS EXPERIMENTAIS REALIZADAS COM MISTURA DE SOLO-CAL.....	46
4.3 RESULTADOS DE PESQUISAS EXPERIMENTAIS REALIZADAS COM MISTURA DE SOLO-BETUME.....	47
4.4 RESULTADOS DE PESQUISAS EXPERIMENTAIS REALIZADAS COM MISTURA DE SOLO-CINZA DE CARVÃO.....	51
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>58</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O modal rodoviário é o modo de transporte de maior utilização no Brasil, embora a sua malha pavimentada tenha crescido apenas cerca de 0,5% entre os anos de 2009 e 2019, conforme o anuário divulgado em 2019 pela CNT (Confederação Nacional de Transportes).

O levantamento da CNT (2019) mostra que apenas 12,4% das estradas brasileiras são pavimentadas. Através dos dados verificados percebe-se que existe uma falta de investimentos em infraestrutura, isso faz com que o valor dos produtos transportados acabe se tornando mais caro, a partir do gasto com manutenção em função do estado deteriorado em que as rodovias se encontram.

A pavimentação de rodovias, em sua maioria, é de jurisdição estadual e federal, entretanto, a utilização de estradas vicinais, que por sua vez não são pavimentadas, se faz necessária por parte dos produtores locais – este também é um fator que colabora para o aumento do valor dos produtos.

Por isso, é preciso buscar outras alternativas que sejam economicamente viáveis para que haja segurança e conforto no tráfego da via, fazendo com que o produtor não perca sua margem de lucro no transporte dos seus produtos (DER/SP, 2012).

Como alternativa do mercado para esta problemática da falta de investimento em infraestrutura, surgiram diversos meios e produtos que levam em consideração o custo benefício, e que melhoram o solo sem ter que pavimenta-lo, atendendo à requisitos que o transformem num solo de melhor qualidade para tráfego, um desses meios foi a estabilização química de solos.

A utilização de aditivos químicos em solos não é uma prática recente, segundo Brito & Paranhos (2017) desde o império romano existem registros da utilização da cal como estabilizante, na execução da via Ápia, porém seu uso só se consolidou após a segunda guerra mundial.

Um dos fatores que ajudaram a impulsionar o desenvolvimento de novos estabilizantes químicos para solos ocorreu em 1952, quando se realizava a primeira conferência voltada a este assunto. Ao final do evento, foi concluído que novas sugestões de aditivos utilizando materiais poliméricos seriam promissoras e que novos métodos poderiam surgir a partir do “trabalho conjunto entre especialistas em química e em solos” (BRAZETTI, 2001, p.4).

Através da revisão bibliográfica pôde-se averiguar o comportamento de diversos tipos de solo e as alterações nas suas propriedades físicas provenientes da utilização de diferentes

tipos de estabilizantes químicos, bem como a eficácia da aplicação de mais de um estabilizante no mesmo solo, afim de potencializar os efeitos de melhoramento.

Este trabalho buscou analisar e comparar resultados obtidos através de ensaios realizados por diversos autores, tais como resistência a compressão simples, resistência a tração por compressão diametral, índice de suporte Califórnia, módulo de resiliência, módulo de resiliência para frente úmida e análise granulométrica.

Sendo assim, este trabalho trará reflexões sobre a utilização de estabilizantes químicos em solos para seu melhoramento. Esta revisão bibliográfica contribuirá com informações importantes em relação a como são utilizados os estabilizantes químicos e como eles agem nos solos, difundindo assim conhecimentos importantes sobre o tema, estimulando o debate e buscando alternativas viáveis na construção civil.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma revisão bibliográfica sobre estabilizantes químicos, seu funcionamento e sua aplicação em estradas.

### 1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- abordar temas relativos à pavimentação, tais como suas camadas e materiais utilizados;
- identificar os efeitos causados pela aplicação de estabilizantes nas características físicas e mecânicas do solo;
- explicar o funcionamento de estabilizações químicas com cal, cimento, emulsão asfáltica e cinzas de carvão para diferentes tipos de solo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

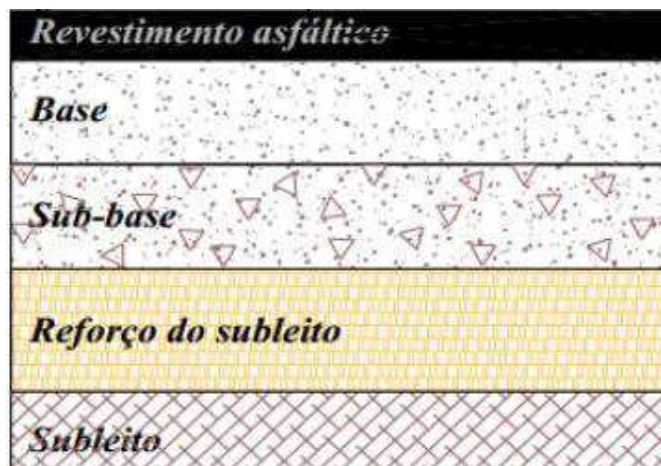
### 2.1 PAVIMENTAÇÃO

#### 2.1.1 ESTRUTURA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

O pavimento é uma estrutura composta de múltiplas camadas, cada uma com espessuras específicas. Tem por objetivo proporcionar segurança, economia e conforto aos usuários em seus deslocamentos. Para isso, torna-se necessário que os pavimentos sejam aptos a resistir às intempéries do meio ambiente bem como suportar os esforços provenientes dos veículos (FUJITA, 2020).

Segundo Bernucci *et al.* (2008) a estrutura dos pavimentos é formada por quatro camadas principais conforme exemplificado na Figura 3 abaixo: revestimento, base, sub-base e reforço de subleito. Dependendo do tráfego e da disponibilidade dos materiais, pode-se ter a ausência de algumas camadas. Todas estas camadas repousam sobre o subleito.

**Figura 1** - Estrutura de pavimento.



Fonte: Bernucci *et al.* (2006).

Conforme o manual do DNIT (2006) as camadas do pavimento podem ser definidas como:

- Subleito: é o terreno de fundação do pavimento;
- Reforço de subleito: é uma camada de espessura constante, posta por circunstâncias técnico-econômicas, acima da regularização, com características geotécnicas inferiores ao material usado na camada que lhe for superior, porém melhores que o material do subleito;



- Sub-base: é a camada complementar à base, quando por circunstâncias técnico-econômicas não for aconselhável construir a base diretamente sobre regularização;
- Base: é a camada destinada a distribuir os esforços oriundos do tráfego sobre a qual constrói o revestimento;
- Revestimento: é a camada tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a melhorá-la, quanto à comodidade e segurança e a resistir ao desgaste.

### 2.1.2 MATERIAIS PRESENTES NAS CAMADAS DO PAVIMENTO

O manual de pavimentação do DNIT define condições e restrições para o tipo de material presente em cada camada, garantindo assim que estes estejam aptos a serem utilizados na estrutura do pavimento. A Tabela 1 a seguir trata destas condições e restrições.

**Tabela 1** - Condições e restrições gerais para os materiais em suas respectivas camadas.

<b>Camada</b>	<b>Condições e Restrições</b>
<b>Materiais do subleito</b>	Devem apresentar uma expansão máxima, medida no ensaio CBR, de 2%, e um Índice de Suporte Califórnia maior ou igual a 2%.
<b>Materiais para reforço do subleito</b>	Devem apresentar Índice de Suporte Califórnia maior que o do subleito e expansão menor ou igual a 1%.
<b>Materiais para sub-base</b>	Devem apresentar Índice de Suporte Califórnia maior ou igual a 20%, Índice de Grupo (IG) = 0 e expansão menor ou igual a 1%.
<b>Materiais para base</b>	Devem apresentar Índice de Suporte Califórnia maior ou igual a 80% e expansão 0,5%, Limite de Liquidez (LL) menor ou igual a 25% e Índice de Plasticidade (IP) menor ou igual a 6%.

Fonte: Adaptado por Fujita com base em dados do CNT e DNIT (2020).

O material presente na base do pavimento ainda deve se encaixar em alguma das seguintes faixas granulométricas presentes na Tabela 2 abaixo, conforme especifica o DNER

(Departamento Nacional de Estradas de Rodagem) na publicação DNER 667/22 referente ao método de projeto de pavimento:

**Tabela 2** - Faixas granulométricas de materiais para base.

Peneiras	Porcentagem em peso passando			
	A	B	C	D
2"	100	100	-	-
1"	-	75 – 90	-	-
2/8'	35—65	40—75	50--85	60—100
Nº 4	25—55	30—60	35--65	50—85
Nº 10	15—40	20—45	25--50	40—70
Nº 40	8—20	15—30	15--30	25—45
Nº 200	2—8	5—15	5--15	5—20

Fonte: Souza (1981).

Para camadas de revestimento, conforme Bernucci *et al.* (2008), os materiais mais utilizados são: concreto asfáltico denso (CA); Camada porosa de atrito (CPA); Stone Matrix Asphalt (SMA); Pré-misturado a quente (PMQ); Areia asfalto a quente; Mistura asfáltica descontínua.

Para camadas de base e sub-base os materiais mais utilizados são: Brita graduada simples; Solo-brita com cimento; Solo arenoso fino laterítico; Solo-brita; Solo-cimento; Solo-cimento-cal. Para reforço de sub-leito os solos mais utilizados são solos lateríticos, solo brita e areia fina.

## 2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Quando o solo é utilizado como fundação, Makusa (2012) lembra que, entre os parâmetros do projeto geotécnico, é de fundamental importância entender e conhecer a capacidade adequada de suporte do subsolo.

Nem sempre um solo tem as propriedades geotécnicas para sustentar a obra projetada, principalmente quando se fala de resistência, quando isso acontece torna-se necessário fazer uma modificação para melhora-lo, modificando suas propriedades para criar um material que atenda às necessidades da construção (MIRANDA & ARANTES, 2019).

O tratamento de um solo inadequado no local da obra se faz necessário para que ele atinja os requisitos mínimos exigidos para o projeto, trocar o local da obra ou substituir o solo natural por outro mais adequado gera um grande gasto que aumenta consideravelmente o orçamento da obra, e aceitar as limitações do solo do local afeta diretamente a sua qualidade (BRITO & PARANHOS, 2017).

Segundo Zuber *et al.* (2013) a alteração no solo visando modificar seus aspectos e propriedades geotécnicas, proporcionando assim sua utilização como material de engenharia civil é denominada estabilização de solos. Este é um tratamento milenar utilizado na pavimentação com a finalidade de melhorar a resistência e durabilidade do solo, diminuir a emissão de poeira e evitar erosão (ROSA *et al.*, 2015).

As justificativas mais relevantes para a utilização de métodos de estabilização de solos, segundo Winterkorn (1975), apud Cristelo (2001), são:

- permitir que estradas secundárias e rurais estejam em melhores condições para tráfego;
- oferecer melhor qualidade de bases para pavimentos em que a utilização de materiais como rocha, geralmente utilizados nesses casos, não é economicamente viável;
- proporcionar a circulação de tráfego, em um curto intervalo de tempo, em determinados ambientes, em caso de emergências militares ou outras.

Entretanto, a principal área de utilização de estabilização de solos é na execução de pavimentos, principalmente nas camadas de base e sub-base. Ao passo que os níveis de qualidade na construção são elevados, maior é a exigência por pavimentos de qualidade e duradouros.

Os fatores mais relevantes para que se utilize a estabilização em um determinado tipo de solo, segundo Carvalho (2011), é a necessidade de se melhorar sua resistência às ações mecânicas e aumentar sua durabilidade sob ação da água.

Reafirmando, segundo Medina & Motta (2004), três métodos de estabilização de solos podem ser destacados: mecânico, físico e químico, sendo apta a adaptação e combinação destes com a finalidade de solucionar um problema.

Para a escolha de melhor método de estabilização a se utilizar, deve-se levar em consideração as seguintes condições em relação ao solo:

- as propriedades que o solo apresenta em condições naturais;
- o tipo de propriedade que se deseja do solo ao aplicar o estabilizante;
- efeitos no solo estabilizado após a estabilização.

O tipo de estabilização que será escolhido será influenciado pela finalidade da obra, pelo custo e principalmente pelas características dos materiais e propriedades do solo que devem ser corrigidas (MALKO, 2015).

### 2.2.1 ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA

A estabilização de maneira mecânica consiste na modificação das propriedades geotécnicas do solo utilizando energias mecânicas, sem o uso de aditivos como betume, cimento, cal, entre outros (AFRIN, 2017).

Segundo Brito (2017) busca-se assim, através da estabilização mecânica, obter uma melhoria por meio de alterações nas proporções de partículas sólidas, líquidas e gasosas do solo. Este efeito é obtido através de diversas operações como compactação do solo, drenagem ou mistura de diferentes tipos de solo.

A estabilização mecânica por meio da compactação do solo tem como finalidade diminuir a porosidade do solo através da aplicação de cargas de forma sucessivas, relacionando o ganho de resistência à diminuição do volume de vazios.

Na pavimentação, esta densificação é utilizada em todas as suas camadas, mesmo que estejam estabilizadas por algum dos outros processos, e é advinda por utilização de algum equipamento mecânico, seja um soquete manual, pequenas valetas, ou por um rolo compactador que é o mais comum e usual entre eles.

Segundo Sartori (2015) a estabilização granulométrica consiste na adição ou retirada de partículas do solo com a finalidade de alterar as propriedades do mesmo. Este método consiste, basicamente, no emprego de um material ou na mistura de dois ou mais materiais, de modo a se enquadrarem dentro de uma determinada faixa granulométrica de forma a atender as especificações normativas.

Segundo Vizcarra (2010) neste tipo de estabilização, o objetivo é a obtenção de um material bem graduado que possua uma porcentagem limitada de partículas finas, através da junção homogênea de dois ou mais solos.

Entretanto, tem-se um limite ao utilizar a estabilização mecânica, pois ao tratarmos de um solo argiloso haverá a possibilidade de geração de lama antes de se atingir o ISC (Índice de Suporte Califórnia), e tratando-se de solos arenosos a compactação poderá ser em vão (MALKO, 2015).

Brito & Paranhos (2017) concluem então que, a estabilização mecânica consiste em aumentar a resistência mecânica do solo, e torna-lo menos vulnerável aos efeitos da água, através da redução dos espaços vazios nele existentes.

### 2.2.2 ESTABILIZAÇÃO FÍSICA

Na estabilização de maneira física, as propriedades do solo são modificadas através da utilização de operações térmicas, elétricas, ou pela aplicação de reforços com materiais não biodegradáveis fibrosos (PINTO, 2006).

Pode-se considerar também como uma forma de estabilização física a utilização da calcinação da argila, com a finalidade de proferir agregados em ambientes onde não se encontram agregados naturais, como na Amazônia por exemplo, onde a utilização de calor intenso proveniente da queima monitorada provoca também uma alteração considerável nos argilominerais que se encontram no solo (NASCIMENTO, 2005; CABRAL, 2005).

Apesar de não ter uma aplicação na pavimentação, existe ainda o processo de se tratar o solo por aquecimento, este tratamento é feito através da inserção de uma mistura de ar comprimido em temperatura elevada com combustível, para isso utiliza-se um tubo perfurado. O tratamento por aquecimento pode ainda ser feito através da utilização de processos elétricos ou queima de combustíveis (CRISTELO, 2001).

### 2.2.3 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

Conforme afirma Patricio (2015), a estabilização química é definida como qualquer procedimento no qual um material químico, seja ele cimentante ou não, é adicionado ao solo gerando melhorias em suas propriedades do ponto de vista da engenharia.

A estabilização através de métodos químicos se dá pela utilização de reações químicas entre aditivos e minerais presentes no solo, estas reações químicas são: a troca de íons, a precipitação, a polimerização e a oxidação (NUNEZ, 1991). Segundo Medina (1987) também há o preenchimento dos poros através do resultado da reação química entre a água e o aditivo.

Diversos são os fatores levados em consideração para a escolha do método que será utilizado para estabilização, estes fatores são, por exemplo, tempo disponível, finalidade da obra, viabilidade econômica, dentre outros, sendo o custo de execução e manutenção o critério mais utilizado para decidir qual o melhor método (AZEVEDO, 2010).

Conforme Gondim (2008) e Makusa (2012) de uma maneira geral, as técnicas de estabilização de pavimentos visam melhorar propriedades mecânicas, seja no que se refere à expansibilidade e compressibilidade, seja no aumento da durabilidade e da permeabilidade do solo. Entende-se, entretanto, que os processos de estabilização não melhoram todas as propriedades de maneira simultânea.

Atualmente existem diversas técnicas de estabilização, entretanto, vários novos métodos vêm sendo desenvolvidos, pois é importante salientar que a estabilização final é alcançada através da combinação de diversos métodos (BRITO & PARANHOS, 2017).

## 2.3 ALTERAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO SOLO

Os principais objetivos da mistura de aditivos ao solo se dão pelo fato de melhorar ou controlar a resistência, a estabilidade volumétrica e propriedades de tensão-deformação. As reações cimentícias, pozolânicas e de troca de cátions com as partículas de argilas são as reações mais recorrentes na estabilização. Os materiais mais usados para a estabilização química de solos são o cimento Portland, a cal, cinza volante e emulsões betuminosas (SANDRONI & CONSOLI, 2010).

Segundo Medina (1987), a mistura entre solo e estabilizador pode ocasionar dois tipos de reações, uma matriz contínua ou uma matriz descontínua. Se o agente estabilizador químico preencher todos os poros dizemos que a mistura formou uma matriz contínua. Neste caso, as propriedades mecânicas deste se sobressaem.

Através da mistura entre solo e estabilizador várias reações são desencadeadas, reações físicas como hidratação, adsorção, evaporação e variação de temperatura, e reações químicas como oxidação, precipitação, troca catiônica, solução, carbonatação e polimerização.

Já quando o agente estabilizador não preenche todos os poros do solo, dizemos que a mistura formou uma matriz descontínua, nessa matriz podem ocorrer a modificação das características das superfícies das partículas, a vedação inerte aos poros, e a interconexão entre as partículas do solo.

Conforme afirma Corrêa (2008) a estabilização de solos tem por objetivo melhorar suas características, tais como: resistência, permeabilidade, e estabilidade volumétrica. A estabilização do solo deve ser pensada a longo prazo, visando não somente corrigir as propriedades naturais do solo, mas também prevenir condições que venham a prejudicar a construção ou a vida útil da obra.

### 2.3.1 ESTABILIDADE VOLUMÉTRICA

Solos expansivos tem como características aumentarem e diminuïrem de volume de acordo com as variações do seu teor de umidade. Entretanto, esta variação e volume pode não coincidir com o maior índice de precipitação ou insolação, dado que existem solos com

permeabilidade muito baixa. Essas alterações de volume se dão apenas em relação à modificação do teor de umidade do solo, só podendo assim manter uma estabilidade volumétrica se mantermos constante a quantidade de água presente no solo (CRISTELO, 2001).

As alternativas de estabilização disponíveis para o controle da variação volumétrica nestes tipos de solo podem ser sintetizadas em transformar o solo em uma massa rígida, cujas partículas resistem às pressões de expansão das argilas ou mesmo, restringir o movimento da água dentro do solo, através da obstrução dos poros (CORRÊA, 2008).

Os índices físicos, limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) ainda são utilizados para avaliar a variação de volume dos solos compactados, bem como a variação do teor de umidade por secagem (contração) ou por imersão em água (expansão). A variação de volume excessiva das camadas dos pavimentos é considerada indesejável para o bom comportamento mecânico dos materiais empregados em camadas de pavimentos flexíveis (SILVA *et al.*, 2011).

### 2.3.2 AUMENTO DA RESISTÊNCIA

A propriedade dos solos em suportar cargas e conservar sua estabilidade, depende da resistência do solo; toda massa de solo se rompe quando esta resistência é excedida (CAPUTO, 2008).

Pinto (2006) salienta que parcela da resistência do solo desaparece quando este é submetido à presença da água e saturação do solo, Cunha *et al.* (2002) explica que isso ocorre porque com o aumento do teor de água, decresce a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno.

Em ambientes pouco úmidos, um solo muito argiloso ao secar torna-se um solo muito duro, entretanto, a resistência de um solo às deformações, quando solicitado, tem maior importância que sua dureza.

Muitas vezes um dos principais problemas com o solo natural encontrado nas obras é a sua resistência insuficiente. Um dos motivos mais frequentes que potencializam esse problema é a ineficiência do seu sistema de drenagem.

Além da umidade, fatores como a distribuição granulométrica de um solo também pode afetar o desempenho da propriedade de resistência do mesmo. Mesclar o solo em níveis granulares distintos confere-lhes uma estrutura mais estável (ARRIVABENI, 2017).

Ao verificarmos os fatores de melhoramento das características de expansão e resistência do solo, chegamos à conclusão que:

Em resumo, as propriedades mecânicas podem ser otimizadas ou mantidas a um determinado nível através da estabilização. Os métodos utilizados para melhorar a estabilidade de volume são também eficazes na manutenção ou melhoramento das propriedades mecânicas, visto que a questão da água no solo é também neste caso identificada como a principal fonte de problemas (CRISTELO, 2001).

### 2.3.3 PERMEABILIDADE

A permeabilidade é a propriedade do solo (meio poroso) que avalia a facilidade de percolação de água através dos seus poros ou vazios. A permeabilidade é medida pelo coeficiente de permeabilidade, que é expresso em unidade de distância por unidade de tempo, e depende de fatores como granulometria do solo, viscosidade do fluido, grau de saturação e estrutura (RODRIGUEZ *et al.*, 2015).

A percolação da água no solo e a dissipação de pressões neutras são problemas gerados pela permeabilidade. Uma das consequências causadas pela dissipação de pressões neutras inadequada e percolação são os deslizamentos em obras de terra. A percolação gera caminhos preferenciais de falhas e fraturas no solo permitindo o avanço do intemperismo, afetando diretamente a dinâmica hidrológica e influenciando na estabilidade (FERNANDES & AMARAL, 2010).

Um dos métodos mais utilizados para diminuição da permeabilidade dos solos é a compactação. Seu efeito causa um aumento da massa específica seca do solo/agregado, diminuindo os espaços vazios presentes, consequentemente aumentando a resistência ao cisalhamento e redução da permeabilidade e compressibilidade (PIRES, 2014).

Segundo Cristelo (2001), as técnicas de estabilização usadas para diminuir a permeabilidade de um solo não obrigatoriamente influenciam a melhora na estabilização de volume ou aumento da resistência mecânica, podendo até mesmo prejudicar estes parâmetros.

A importância de se manter um certo nível de impermeabilização está ligada à proteção do solo contra problemáticas como a erosão, estradas não pavimentadas, por não serem impermeabilizadas dada a ausência de capa asfáltica, estão mais sujeitas a esse tipo de problema, o que justifica o tratamento dessas vias com estabilizantes ou alternativas que minimizem tais riscos (ARRIVABENI, 2017).



### 2.3.4 DURABILIDADE

Segundo Lima *et al.* (1993), a durabilidade pode ser definida como sendo a capacidade de um material manter a sua integridade quando submetido à ação de agentes externos, seja intempéries do meio ambiente, ou cargas.

Uma das principais dificuldades da estabilização de solos é a ausência de testes que permitam averiguar a verdadeira durabilidade do solo estabilizado, tornando assim essa propriedade uma das mais difíceis características de se avaliar nos solos. Essa dificuldade acarreta muitas vezes no superdimensionamento na utilização do estabilizante, o que pode não ser muito viável economicamente falando (CRISTELO, 2001).

Conforme Machado *et al.* (2006) a literatura técnica é rica em relatos sobre o estudo da durabilidade por molhagem e secagem de misturas solo-cimento. Contudo, com relação a outros estabilizantes químicos, não se tem muita informação sobre estudos prévios.

### 2.4 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO POR MÉTODOS QUÍMICOS

Segundo Kammer & Arns (2013), os métodos de estabilização química surgiram inicialmente da necessidade de estabilizar solos argilosos. Isso se deu porque os solos argilosos tem como característica sua dependência da umidade, pois quanto maior o nível de água retida, maior é a perda de resistência ao cisalhamento, o que acaba tornando o solo inutilizável em obras como pavimentação de rodovias e ferrovias (CAPUTO, 1988).

Conforme afirma Caputo (1988), a constituição de solos argilosos é composta de grãos finos que, em conjunto, formam um solo mole com características hidrofílicas em suas partículas, o que gera uma tendência de inchaço quando seu teor de umidade é aumentado.

Makusa (2013) conclui que a utilização de estabilizadores químicos gera reações químicas que auxiliam o solo a atingir um nível de umidade pertinente para melhorar a compactação, diminuindo de forma considerável o fenômeno de capilaridade e o número de poros existentes.

O resultado das modificações causadas no solo através da utilização do estabilizador químico deve ser a melhora das propriedades físicas e mecânicas, que pode lhe tornar apto a ser utilizado em diversas obras da engenharia civil.

A estabilização química do solo caracteriza-se por ser uma técnica que trata de alterar de forma permanente diversas propriedades do solo, melhorando sua capacidade de suporte e

diminuindo sua expansão, gerando assim uma maior constância volumétrica, além de diminuir sua permeabilidade e compressibilidade (FERNANDES, 2005).

Segundo Afrin (2017), historicamente, a utilização em grande escala da estabilização química teve início próximo a segunda guerra mundial, e segue sendo utilizada até hoje de forma muito ampla, especialmente no tratamento do subleito de obras de pavimentação.

Os principais tipos de estabilização química e suas características serão descritas a seguir.

#### 2.4.1 SOLO-CIMENTO

Praticamente todos os tipos de solo podem ser estabilizados através da utilização de diversos tipos de cimentos que existem, argilas com um alto índice de plasticidade e que possuam um teor entre 1 e 2% de matéria orgânica na sua composição podem apresentar dificuldades, necessitando assim de uma alta porcentagem de cimento para que haja uma modificação significativa nas suas propriedades mecânicas. O cimento mais utilizado é o Portland, este adquire resistência através de hidratação, gerando uma reação com a água (SANDRONI & CONSOLI, 2010).

Os principais componentes químicos do cimento Portland são: Silicato Tricálcico (C3S); Silicato Dicálcico (C2S); Aluminato Tricálcico (C3A); Aluminoferrito Tetracálcico (C4AF).

A resistência inicial do cimento Portland é atingida pelo endurecimento rápido do Silicato Tricálcico, enquanto o Silicato Dicálcico enrijece mais devagar, aumentando a resistência do concreto ao longo do tempo após decorrida uma semana.

O componente Aluminado Tricálcico é responsável pela liberação de grande quantidade de calor ao longo dos primeiros dias de enrijecimento, e isso tem pouca contribuição para o desenvolvimento de resistência inicial.

Exceto em areias uniformes, onde esses requisitam de mais cimentos que solos arenosos que contém silte e argila, a fração de cimento utilizada para que se haja uma estabilização do solo aumenta conforme aumenta a fração de granulometria fina do solo.

Conforme afirma Medina (1987), a estabilização química da mistura solo e cimento pode ser dividida em três classes, solo-cimento, solo modificado ou melhorado e solo-cimento plástico.

O solo-cimento é caracterizado por atingir um enrijecimento através da cura da mistura e compactação mecânica do solo, cimento e água. Esse tipo de solo melhorado é utilizado com

mais frequência como base ou sub-base, sua qualidade é definida por avaliação de durabilidade e resistência à compressão simples de corpos de prova do material.

O solo modificado ou melhorado caracteriza-se pela alteração da capacidade de carga do solo e dos seus índices físicos, é um material não endurecido ou semi-endurecido. O teor de cimento nesse tipo de solo é caracterizado por não ser maior que 5%, geralmente é um solo utilizado como base, sub-base ou subleito.

Já o solo-cimento plástico, diferentemente do solo cimento, possui uma maior quantidade de água utilizada no momento de sua mistura, caracterizando-se assim por possuir uma consistência de argamassa nessa fase do processo de estabilização, é um tipo de solo utilizado em revestimento de valas, taludes e canais.

A dosagem para solo-cimento pode ser realizada através de dois métodos segundo Macêdo (2004), o primeiro método é estabelecido pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), o segundo método foi desenvolvido pelo Professor Francisco José Casanova de Oliveira e Castro, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, e é um método denominado físico-químico.

O método de Casanova (1992) é o método adotado pela norma do DNIT. Neste método, o objetivo é avaliar o volume ocupado dos sedimentos através da floculação da argila ao longo de vários dias.

Misturas de solo com porcentagens diferentes de cimento em relação à massa do solo são colocadas, em mesmo volume, em provetas, e misturadas com água e água destilada, com o mesmo volume em todas as provetas, até as misturas se tornarem homogêneas.

Depois de homogeneizadas as amostras são mantidas até que haja a floculação do material, no dia seguinte é feita a leitura do seu volume, em seguida a mistura é novamente homogeneizada, este processo de leitura e homogeneização é realizado durante os dias até que o volume da mistura se mantenha constante ou comece a decrescer, onde o volume for maior é a porcentagem de cimento desejada a ser adicionada ao solo para que haja sua estabilização.

#### 2.4.2 SOLO-CAL

As características do solo ditam qual será a quantidade de cal que deverá ser utilizada neste tipo de tratamento, bem como também influenciam as características mecânicas desejadas para a mistura e a finalidade de uso que este solo terá (SANDRONI & CONSOLI, 2010).

A divisão de classes de tratamento de solo com cal são duas, a modificação de solo com cal e a estabilização de solo com cal. Na modificação de solo com cal, há uma melhora na

trabalhabilidade do solo, uma redução na plasticidade e um aumento de resistência à erosão. A estabilização de solo com cal é caracterizada por reações pozolânicas o que acarreta um aumento definitivo da rigidez e resistência do solo.

A cal reage com os minerais da argila, para que assim haja uma melhora nas propriedades mecânicas do solo, assim podemos concluir que, em solos com baixo teor de argila, o tratamento com a cal não se torna eficaz.

Conforme Sandroni e Consoli (2010) afirmam, quatro são as reações básicas ocorrentes em solos coesivos quando estes reagem com a cal, a carbonatação, a flocculação/aglomeração, as reações pozolânicas e a troca catiônica.

A carbonatação acarreta uma diminuição na quantidade de cal presente para produção de reações pozolânicas, sabendo disso, conclui-se que é um processo prejudicial ao melhoramento de solo. Esta carbonatação ocorre através da reação entre o dióxido de carbono, presente na água ou no ar, e a matriz solo-cal, onde a cal é revertida em carbonato de cálcio.

A flocculação e a aglomeração de partículas de argila, ocorrente em solos tratados com cal, são provenientes parcialmente da troca de cátions, esta troca resulta da mistura de cal e água, que gera cátions de cálcio livres, estes substituem outros cátions que estão inseridos no complexo de trocas catiônicas que acontecem no solo.

A reação de flocculação e aglomeração resulta na união de partículas de argila, fazendo com que estas gerem partículas de maiores dimensões conseqüentemente alterando a textura do solo.

Água e cal reagem com alumina e sílica que se encontram no solo afim de gerar inúmeros componentes cimentícios. A fonte de sílica e alumina dos solos se encontram em minerais argílicos, feldspato, quartzo, micas entre outros silicatos e alumino-silicatos semelhantes. As reações provenientes desses componentes são as reações pozolânicas, acontece semelhantemente como nos solos tratados com cimento.

O pH do solo é aumentado através da adição de cal, fazendo assim com que a solubilidade da sílica e da alumina encontrada no solo aumente, o que aumenta assim a quantidade de água que se pode inserir no solo até que este torne-se saturado, conseqüentemente aumentando o número de reações possíveis a serem feitas entre água, cal e sílica/alumina.

Os fatores e características primordiais que se deve identificar em um solo para se determinar o sucesso da reação de solo-cal são o pH do solo, a mineralogia da fração de argila, o teor de matéria orgânica, o grau de intemperismo e a presença de sulfatos (ATTOH-OKINE, 1995).

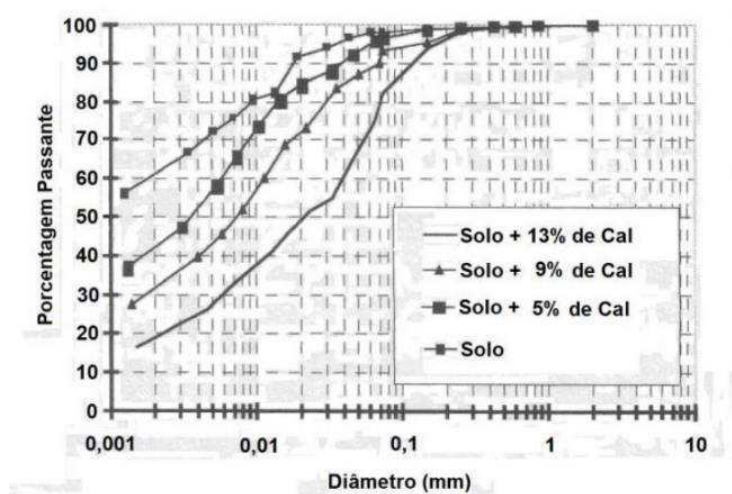
#### 2.4.2.1 PROPRIEDADES DO SOLO-CAL

Consoli *et al.* (1997) afirma que o primeiro efeito da realização da mistura de solo-cal é a mudança na granulometria, melhoria na trabalhabilidade e a redução do índice de plasticidade, e em seguida, através da cimentação de partículas, ocorre o ganho de resistência.

Ele ainda apresenta em seu estudo um exemplo da cal utilizada no tratamento de um solo argiloso, este solo possuía 71% de fração de argila, 3% de teor de matéria orgânica, e um pH 3,9. Foram aplicados ao solo natural no tratamento porcentagens de 5, 9 e 13% de cal, em seguida analisados e comparados o efeito desta mistura sob a distribuição granulométrica do solo (este resultado pode ser identificado pelo gráfico da Figura 6).

Partindo destes resultados podemos observar as mudanças de granulometria no solo provenientes da floculação-aglomeração, e ver que a floculação aumenta conforme aumenta a quantidade de cal.

**Figura 2** - Resultados da distribuição granulométrica do solo natural e tratado com 5, 9 e 13% de cal.



Fonte: Consoli *et al.* (1997).

O método utilizado para dosagem de cal a ser utilizada na mistura solo-cal é o método do pH criado por Eades & Grim em 1966 (ROGERS *et al.*, 1997).

O método do pH consiste no teor mínimo de cal que produza um aumento no valor do pH do solo para 12,4. A variação desse método proposto por Rogers *et al.* (1997) é de que o teor mínimo de cal é aquele onde o pH atinge um valor máximo constante.

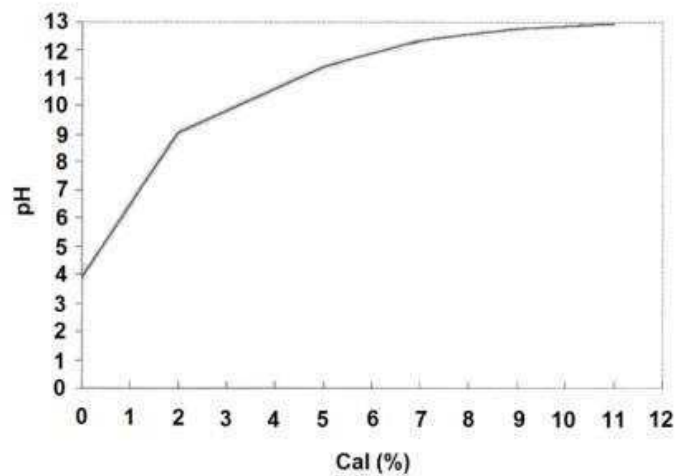
Entretanto, segundo Eades & Grim (1966) o método do pH apresenta limitações para utilização em solos tropicais e subtropicais, eles examinam que a porcentagem ideal de cal

obtida para estes tipos de solo, através deste método, não produz a máxima resistência à compressão dos mesmos.

Assim os autores afirmam que este teste para solos tropicais e subtropicais deve ser usado apenas como referência, mas não assegura se a reação do solo com a porcentagem de cal obtida produzirá um aumento substancial de resistência.

A Figura 7 mostra este método realizado no solo estudado por Consoli *et al.* (1997) o qual conclui-se que 11% é a mínima quantidade de cal para que haja uma estabilização do solo.

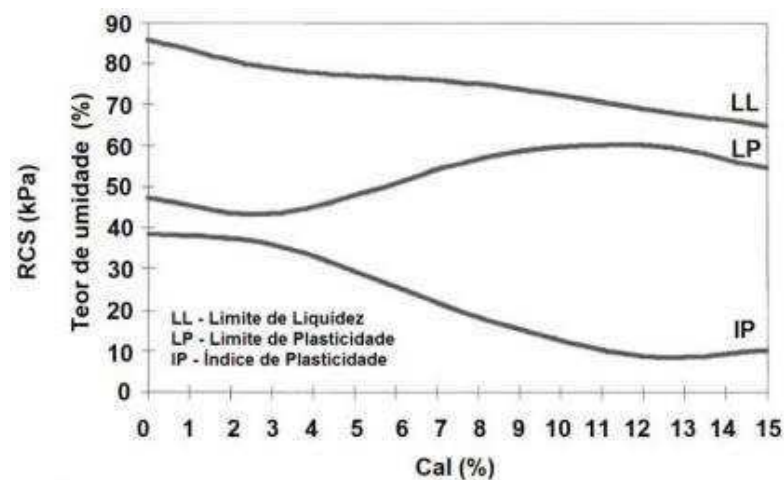
**Figura 3** - Variação do pH em relação ao aumento da porcentagem de cal adicionada ao solo.



Fonte: Consoli *et al.* (1997).

Na Figura 8 a seguir podemos ver como a adição de cal influencia nos limites de Atterberg de um solo através do gráfico do estudo realizado por Consoli *et al.* (1997).

**Figura 4** - Variação dos limites de Atterberg em relação ao aumento da porcentagem de cal adicionada ao solo.

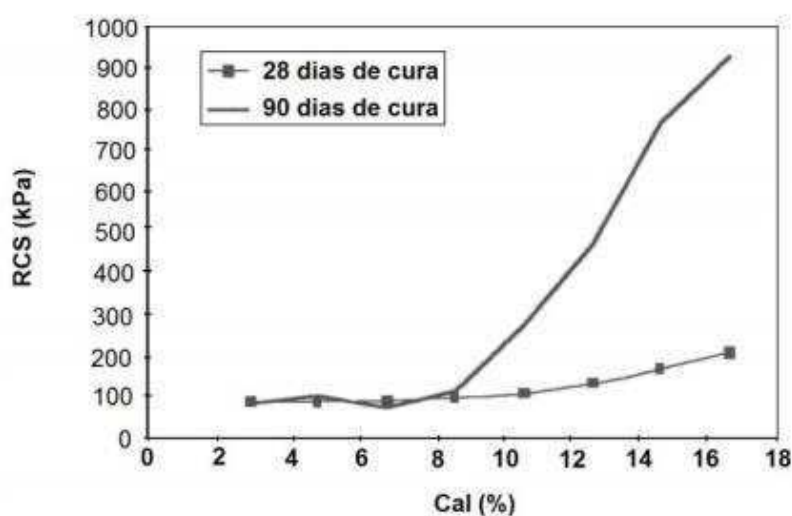


Fonte: Consoli *et al.* (1997).

Com o aumento do limite de plasticidade, aumenta-se a volume de água que se pode ser inserido ao solo, aumentando assim a quantidade de reações possíveis a serem realizadas no solo.

A resistência a compressão simples na argila, aos 28 dias e aos 90 dias de cura, também foi testada por Consoli *et al.* (1997) em seus estudos. Na figura 9 podemos verificar e confirmar que não ocorre estabilização do solo até atingir 10% de quantidade de cal adicionada ao solo, o que confirma o método do pH também utilizado no estudo.

**Figura 5** - Variação da resistência a compressão simples em relação ao aumento da porcentagem de cal adicionada ao solo.



Fonte: Consoli *et al.* (1997).

Com isso Malko (2015) conclui que a cal altera as propriedades do solo em diversos aspectos:

- distribuição granulométrica: ocorre uma modificação granulométrica no solo proveniente da floculação-aglomeração.
- plasticidade: O índice de plasticidade diminui com a utilização da cal, pois o limite de plasticidade cresce ao passo que o limite de liquidez tende a diminuir.
- variação de volume: solos expansivos tratados com cal tem uma redução na variação do volume ao absorver água.
- compactação: a densidade diminui e o teor de umidade ótima aumenta quando se trata um solo com cal

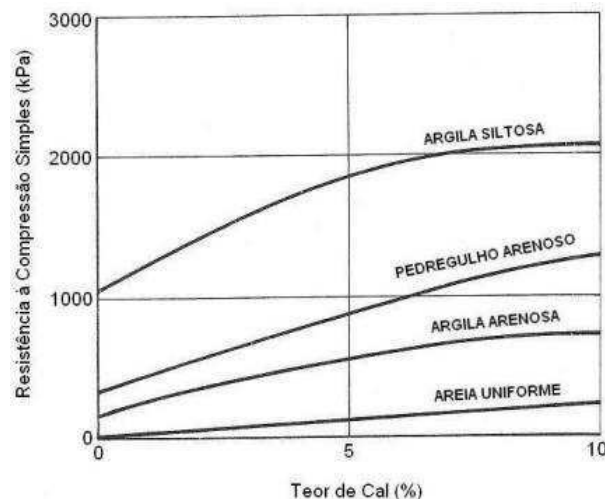
As trocas catiônicas e a formação de produtos cimentantes aumentam conforme maior for o teor de cal, entretanto não existe um teor ótimo de cal a ser adotado para todos os solos,

tornando essencial a experiência de campo e laboratório para determinação deste teor (MALKO, 2015).

#### 2.4.2.2 EFEITOS DA CAL NOS COMPORTAMENTOS MECÂNICOS DO SOLO

A resistência de misturas solo-cal normalmente é avaliada através dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS), triaxial e Índice De suporte Califórnia (ISC). Segundo Inglês & Metcalf (1972), conforme podemos ver no gráfico da Figura 10, o aumento de RCS aumenta de forma linear com a quantidade de cal até certo ponto, em seguida ocorre uma diminuição na taxa de crescimento da resistência em relação à adição de cal, isso se dá pela lenta cimentação da mistura de solo-cal.

**Figura 6** - Taxa de crescimento de resistência à compressão simples com aumento da porcentagem de cal aplicada em diferentes tipos de solo.



Fonte: Inglês & Metcalf (1972).

Em relação à resistência ao cisalhamento de um solo fino, segundo Sandroni e Consoli (2010) o principal efeito da adição de cal no mesmo é o de produzir um substancial aumento da coesão, diferentemente do ângulo de atrito entre as partículas onde o aumento é bem menos expressivo. Como as tensões atuantes em pavimentos flexíveis são baixas, é de maior importância se ter esse aumento de coesão e não tanto de ângulo de atrito.

Em pesquisa realizada por Consoli *et al.* (1997) são apresentados resultados obtidos ao estudar a resistência em tensões efetivas do solo e solo-cal, com o solo-cal possuindo 5, 9 e 13% de cal em diferentes tempos de cura (7 a 180 dias de cura), tais resultados estão presentes na Tabela 3 abaixo.



**Tabela 3** - Parâmetros de resistência em tensões efetivas do solo e solo-cal com 5, 9 e 13 % de cal e tempos de cura estudados (7 a 180 dias de cura).

Misturas	Tempo de Cura (dias)	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de Atrito (graus)
<b>Solo</b>	sem cura	0,0	40,6
<b>Solo + 5% de cal</b>	7	0,0	39,4
	28	0,0	39,8
	90	0,0	39,9
<b>Solo + 9% de cal</b>	7	0,0	40,1
	28	0,0	39,8
	90	0,0	40,9
<b>Solo + 13% de cal</b>	7	0,0	38,4
	28	0,0	39,2
	90	50,9	38,3
	180	86,6	39,3

Fonte: Consoli *et al.*, 1997.

Pode-se verificar que para valores de porcentagem de cal adicionada menores que o necessário para estabilização do solo, não ocorre nenhuma modificação no parâmetro de resistência do mesmo, e ainda assim quando houve, no caso de 13% o tempo de cura foi um fator determinante para esse aumento de resistência.

### 2.4.3 SOLO-BETUME

Conforme afirma a ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto) (2010), o solo-betume consiste no “produto resultante da mistura de solos, geralmente locais, com emulsão asfáltica, na presença, ou não, de fílers minerais ativos, em equipamentos apropriados, espalhada e compactada a frio”.

Com a adição de um ligante asfáltico ao solo, esta mistura passa a ter um melhor desempenho mecânico e uma melhora na sua impermeabilização, propiciando um melhor comportamento ao receber esforços provenientes do tráfego, bem como resistente às consequências de variação de umidade (MICELLI, 2006).

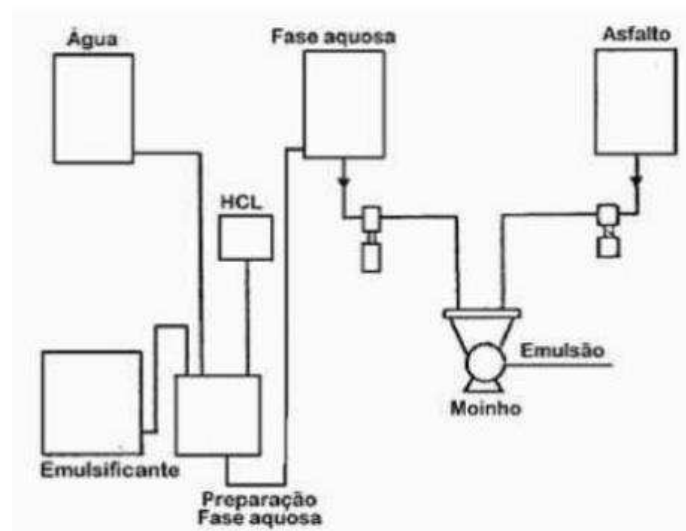
#### 2.4.3.1 EMULSÃO ASFÁLTICA

Em virtude de água e asfalto serem materiais imiscíveis, faz-se necessária a ocorrência da emulsão asfáltica para que a estabilização de solo-betume seja ocasionada. O agente

emulsificante serve para manter a solução estável, através da redução da viscosidade do cimento asfáltico de petróleo (CAP), tornando possível assim sua utilização em temperaturas mais baixas (BERNUCCI *et al.*, 2006; CREATTI *et al.*, 2005).

A produção de uma emulsão asfáltica se dá através da mistura entre a fase aquosa e o concreto asfáltico de petróleo num moinho coloidal, a fase aquosa é uma mistura entre água, emulsificante e ácido, no moinho ocorre a dispersão da mistura através de energia mecânica. Este processo pode ser esquematizado na figura 11 a seguir (ABEDA, 2010; BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2006).

**Figura 7** - Processo de produção da emulsão asfáltica.



Fonte: Senço (2001).

Através da força centrífuga do moinho, o asfalto é quebrado em glóbulos (micropartículas), pela força de atração entre as moléculas de asfalto o normal seria que estas se unissem, porém o agente emulsificante envolve as micropartículas de asfalto evitando que isso aconteça, fazendo com que a emulsão se torne uma mistura estável (BRASQUIMICA, 2012).

#### 2.4.3.2 RUPTURA DAS EMULSÕES ASFÁLTICAS

A ruptura da emulsão asfáltica é o fenômeno que ocorre quando há uma separação do material betuminoso e a água, a emulsão pode ser catiônica ou aniônica. Este fenômeno ocorre, no caso das emulsões catiônicas, quando o emulsificante entra em contato com o agregado.

Através do desequilíbrio elétrico, causado pela alcalinidade ou aumento de acidez ou ainda pela ação do agregado, as micropartículas de asfalto são atraídas pelo agregado através

de forças eletrostáticas, a evaporação da água presente na mistura de emulsão também colabora para que estas micropartículas de asfalto se unam ao agregado, em emulsões aniônicas há apenas a evaporação da água (SANTOS, 2009).

Segundo a Petrobrás (1996) apud Castro (2003), as emulsões catiônicas são as mais utilizadas em pavimentações rodoviárias no Brasil, isso se dá pelos aspectos dos agregados aqui presentes.

Um dos parâmetros mais importantes de se saber é a velocidade em que a ruptura vai ocorrer, por isso é muito importante saber qual a classificação da emulsão asfáltica utilizada no melhoramento de solo, a emulsão pode ser de três tipos: Ruptura Rápida (RR), Ruptura Média (RM) e Ruptura Lenta (RL).

Rupturas rápidas contém percentuais baixos de agente emulsificante, muito indicadas para pintura de ligação e construção de revestimentos por penetração. E as EA (emulsão asfáltica) de ruptura média e lenta, são usadas para misturas com os agregados graúdos e miúdos, respectivamente (DNER, 1996).

As principais características de uma emulsão que define seu tempo de ruptura são: a quantidade de emulsificante presente na mesma, a temperatura em que a emulsão é aplicável, quantidade de concreto asfáltico de petróleo e sua viscosidade. A partir destas especificações as emulsões asfálticas são classificadas para que se possa julgar se aquele tipo de emulsão é próprio para o tipo de serviço encontrado em campo (ABEDA, 2010; BALBO, 2007).

Conforme o Santos (2009), a classificação das emulsões asfálticas estão presentes em sua simbologia, a letra “C” indica que o tipo de emulsão é catiônica, os números que aparecem estão relacionados à viscosidade e conseqüentemente também à quantidade de concreto asfáltico de petróleo presente na emulsão. Podemos ver as principais classificações de emulsão asfáltica na Tabela 4 a seguir.

**Tabela 4** - Classificação das emulsões asfálticas.

<b>Tipo</b>	<b>Denominação</b>
<b>RR</b>	Ruptura rápida
<b>RM</b>	Ruptura média
<b>RL</b>	Ruptura lenta
<b>RR1C-E</b>	Emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida modificada por polímeros elastoméricos usada para pintura de ligação
<b>RR2C-E</b>	Emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida modificada por polímeros elastoméricos usada para tratamentos superficiais e macadame betuminoso

<b>RM1C-E</b>	Emulsão asfáltica catiônica de ruptura média modificada por polímeros elastoméricos usada para pré-misturados a frio
<b>RC1C-E</b>	Emulsão asfáltica catiônica de ruptura controlada modificada por polímeros elastoméricos usada para micro revestimentos a frio
<b>RL1C-E</b>	Emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta modificada por polímeros elastoméricos usada para pré-misturados a frio
<b>EAI</b>	Emulsão asfáltica para imprimação
<b>LA - LAN</b>	Lama asfáltica de ruptura lenta catiônica e neutra, respectivamente
<b>LARC</b>	Emulsão asfáltica catiônica de ruptura controlada para lama asfáltica

Fonte: Adaptada de Ceratti *et al.*, 2015.

Para a execução do solo-betume, não são aconselhadas emulsões RR, dada a sua rápida reação com o solo, sendo mais utilizadas as emulsões RM e RL, entretanto em solos plásticos emulsões RL não são aconselháveis, dado que mesmo depois da compactação há a possibilidade de materiais voláteis não deixarem a mistura (YODER & WITCZAK, 1975).

Segundo Moreira (2006) apud Sant'ana (2009) A emulsão asfáltica é um método que possui uma ótima compatibilidade química com a natureza mineralógica dos solos e agregados, possui uma boa trabalhabilidade e controle de velocidade de ruptura. As emulsões catiônicas mais recomendadas são a RL-1C para solos finos e a RM-1C para solos granulares.

#### 2.4.3.3 SOLOS PROPÍCIOS A ESTABILIZAÇÃO COM BETUME

Para a determinação do sucesso de uma estabilização de solo com emulsão asfáltica, várias características devem ser levadas em consideração sobre o solo in natura, alguns exemplos de características de granulometria e características físico-químicas são (ABEDA, 2010; ASPHALT ACADEMY, 2009; MOREIRA, 2010; YODER, 1957):

- materiais britados com equivalente de areia maior que 30% e até 15% de conteúdo passante na peneira nº 200 têm bons resultados de estabilização;
- solos com Índice de Plasticidade (IP) menor que 8 e equivalente de areia entre 20 a 30%, 20% de conteúdo passante na peneira nº 200, são economicamente viáveis para estabilização;

- para solos coesivos, o material asfáltico funciona como impermeabilizante, visto que é redundante a promoção do aumento da coesão desse solo;
- quanto mais fino o solo, maior o teor de material asfáltico necessário para envolver suas partículas. O excesso de ligante faz com que a estabilidade diminua, ou seja, funciona como um lubrificante ao invés de estabilizante;

Vários autores estabeleceram parâmetros para determinados tipos de solo serem considerados viáveis à estabilização com solo-betume, estes parâmetros envolvem os limites de Atterberg e a porcentagem passante na peneira de abertura 0,075mm para cada tipo de solo, estas especificações podem ser verificadas na Tabela 5.

**Tabela 5** - Recomendações de solos para estabilização com betume.

<b>Tipo de solo</b>	<b>LL/LP do solo</b>	<b>% passante # 0,075 mm</b>	<b>Fonte</b>
<b>Areias</b>	IP máximo de 12%	25% máximo	YODER e WITCZACK (1975)
<b>Pedregulhos e areias pedregulhosas</b>	IP máximo de 12%	15% máximo	
<b>Solos finos</b>	IP máximo de 18% LL máximo de 40%	35% máximo	
<b>Solos em geral</b>	IP máximo de 18% LL máximo de 40%	10 a 50%	KÉZDI (1979)
<b>Solos em geral</b>	IP máximo de 14%	5% mínimo	VOGT (1971)
<b>Solos arenosos</b>	-	35% máximo	DER 3.07 (1988)
<b>Solos argilosos</b>	IP máximo de 6% LL máximo de 30%	35% máximo	
<b>Materiais britados</b>	-	15% máximo	ABEDA (2001)
<b>Solos em geral</b>	IP máximo de 8%	20% máximo	
<b>Solos em geral</b>	-	25% máximo	ASTM (2006)

Fonte: Adaptado de Miceli Júnior, 2006.

No estudo de estabilização de solos com emulsão asfáltica realizado por Micelli (2006), foram realizados ensaios de tração direta, modo de resiliência e de compressão simples, e os resultados desse estudo foram satisfatórios. Dois tipos de emulsão, com teores de 4% e 8%,

foram utilizados em três tipos de solos diferentes, o tempo de cura utilizado para análise das misturas foram de 7 e 28 dias.

Ao final do estudo, ele concluiu que a relação solo-emulsão em solos granulares gera uma melhoria em todos os parâmetros através do aumento da coesão da mistura, pois, através da emulsão, o solo se transforma numa espécie de areia-asfalto. Foi verificado também a necessidade de 7 dias de cura para que ocorra a estabilização.

Além das características de solo recomendadas para a estabilização de solo-betume, a ABEDA (2010) afirma que fatores de projeto também influenciam no sucesso do desempenho do solo-betume, esses fatores são compreendidos como sendo uma compactação feita na umidade ótima, um tempo de secagem adequado e um processo de mistura bem efetivado.

Conforme esclarece a ABEDA (2010) as principais vantagens de se estabilizar um solo com estabilização betuminosa são:

- nenhum dos materiais envolvidos no processo precisa de aquecimento, o que gera uma economia de energia na sua aplicação.
- o custo de execução e manutenção é baixo.
- através da utilização de materiais próximos à obra há uma preservação dos recursos naturais.
- elevada impermeabilização das camadas de base.
- boa resistência à fadiga e às trincas térmicas.

#### 2.4.4 SOLO-CINZA DE CARVÃO

Desde dois mil anos antes de cristo a prática de utilização de cinzas vulcânicas como aditivo às argamassas é utilizada pelos romanos, estes buscavam o material na base do vulcão Vesúvio, que se localizava em Pozzouli, local que deu origem à denominação “pozolana” (PINTO, 1971; NARDI, 1975).

Conforme afirma Lopes (2011), com a chegada do século XX e o desenvolvimento industrial, as cinzas provenientes da queima de carvão passaram a ser geradas numa quantidade muito maior devido ao crescimento das termelétricas. Assim para solucionar a problemática do descarte deste resíduo em larga escala, foram realizadas várias pesquisas com o intuito de utilizar estas cinzas para fins comerciais, fazendo com que recursos naturais fossem poupados.

#### 2.4.4.1 DERIVAÇÃO E ORIGEM DAS CINZAS

Segundo Rhode *et al.* (2006) as cinzas se formam através da combustão do carvão, que é uma matéria prima sólida, o carvão pode ser classificado como uma mistura de duas repartições, uma orgânica, que é material volátil mais carbono fixo, e uma mineral, que são as argilas, piritas, quartzo, carbonatos e etc.

Com a queima do carvão, sua fração orgânica gera voláteis e coque, ao passo que a fração mineral se transforma em cinza, com mineralogia modificada, pois com a queima, as argilas perdem água, os carbonatos são decompostos, os sulfetos são oxidados, etc.

Apesar das cinzas serem provenientes da parte mineral do carvão (componentes não combustíveis), estas também possuem sua fração orgânica, que são as partículas não queimadas devido à combustão incompleta do carvão pulverizado (NARDI, 1975).

As cinzas podem ser classificadas de três formas, de acordo com o processo de gaseificação ou queima do carvão (RHODE *et al.*, 2006):

- escória/cinza grossa: Este tipo de cinza se origina através da gaseificação ou combustão do carvão em grelhas móveis ou fixas. Possuem granulometria grosseira na maioria das vezes, e um teor de carbono não queimado considerável (10 a 20%). Essas cinzas são resfriadas com água e recolhidas pelo fundo das fornalhas;
- cinza de Fundo/ cinza pesada/ cinza úmida: Estas cinzas são originadas pela combustão do carvão em forma pulverizada e da queima ou gaseificação do carvão em leito fluidizado, os teores de carbono não queimado neste tipo de cinza são de 5 a 10%. Possuem mais peso e grossa granulometria, caem para o fundo das fornalhas e gaseificadores, sua retirada é feita através do fluxo de água, principalmente nas grandes caldeiras de usinas térmicas e centrais de vapor;
- cinza leve/cinza volante: Possuem granulometria fina, 100% menor que 0,15mm, suas partículas leves são levadas pelos gases provenientes em gaseificadores industriais e pelos gases de combustão de fornalhas. Utiliza-se sistemas de captação como filtros de tecido, precipitadores eletrostáticos, ciclones e etc. para retirada dessas partículas. Os maiores produtores deste tipo de cinza são centrais de vapor e usinas termelétricas.

Ao observar as características mineralógicas e físico-químicas das cinzas, estas podem ser consideradas um recurso mineral muito considerável, dado que estas características são

pouco encontradas em outros tipos de materiais, as cinzas também possuem uma característica muito importante, que é sua alta capacidade de reação com a cal, através da reação com a cal os componentes perigosos ou tóxicos em potencial presentes nas cinzas são imobilizados (ROHDE *et al.*, 2006).

A categoria de maior reutilização desses subprodutos do carvão mineral é a construção civil, as aplicações abrangem tanto cinzas volantes como cinzas pesadas, seja na sua reutilização para concretos e argamassas, fabricação de cimento Portland pozolânico, processos de estabilização sob pressão, aterros estruturais ou sem função estrutural, bases estabilizadas e solos modificados para rodovias (ROHDE *et al.*, 2006).

#### 2.4.4.2 REUTILIZAÇÃO DAS CINZAS DO CARVÃO MINERAL EM SOLOS

Conforme afirma Nardi (1965) em 1938, nos Estados Unidos, foi quando ocorreu a primeira utilização de cinzas volantes com foco na pavimentação, o Distrito Sanitário de Chicago optou por substituir de 20 a 50% do cimento que seria utilizado no pavimento por cinzas volante, isso ocorreu numa rodovia local de meia milha de extensão. Ainda conforme o autor relata, também foram utilizadas 730 mil toneladas de cinzas para construção de pistas de pouso no aeroporto de Newark, também nos Estados Unidos, ainda foi verificado, após 5 anos de utilização, a diminuição nos custos de manutenção se comparado com pavimentos comuns.

Países como Inglaterra, Suécia, França, Rússia, e muitos outros, possuem pavimentação com reutilização de cinzas como uma alternativa convencional. Isso se dá por a Europa, a partir de 1960, ter difundido a utilização de cinzas de carvão estabilizadas como aglomerantes de base, sub-bases e reforços de subleitos (ROHDE *et al.*, 2006).

Nunes *et al.* (1996, apud Lopes, 2011) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Nottingham estudaram o emprego de diversos tipos de resíduos na pavimentação, entre eles as cinzas pesadas provenientes do carvão mineral. Os benefícios avaliados do emprego deste tipo de resíduo no estudo realizado foram:

- redução da demanda de materiais primários e convencionais;
- redução dos custos energéticos ligados à extração e o transporte de agregados convencionais;
- redução dos custos de manutenção ambientais, relacionados à recuperação de jazidas de materiais convencionais proveniente da sua exploração;



- redução dos problemas ambientais e econômicos relacionados à estocagem e descarte dos resíduos
- benefícios comerciais provenientes da utilização de materiais residuais, dado que estão são financiados pelo processo em que são gerados.

#### 2.4.4.3 SOLO-CINZA VOLANTE

A utilização de cinzas volantes como material adicionado ao solo parte do objetivo de tornar solos, inicialmente não compatíveis à estabilização com cal, aptos para tal, pois a adição de cinzas volantes, auxilia na reação com a cal, quando o solo in natura não possui a quantidade desejada de pozolana. A reação pozolânica é proveniente da reação entre cal e cinza-volante, onde esta reação origina um composto que possui propriedades cimentantes (NARDI, 1975).

Nardi (1975) afirma ainda que, em solos desprovidos de finos, mal graduados e uniformes, torna-se de difícil aplicação as estabilizações mais convencionais, pois o maior volume de vazios e menor contato entre as partículas são consequências da uniformidade das partículas destes tipos de solo, e isso dificulta a cimentação.

Com base nisso pode-se dizer que em solos arenosos, que possuem uma escassez de argila coloidal, não reagem satisfatoriamente com a cal, e que a ao adicionar cinza volante, substituindo a fração fina do solo, que seria a argila, este torna-se reativo à cal (ROSA, 2009).

#### 2.4.4.4 SOLO-CINZA DE FUNDO

Diferentemente das cinzas volantes, o emprego das cinzas de fundo para estabilização de solos é mais recente e menos usual. Entretanto, afim de se estudar o efeito que esse tipo de cinza realiza no solo quando empregada, com ou sem cal, diversos estudos foram realizados recentemente como os estudos de Farias (2005), Leandro (2005), Nunes *et al.* (1996), Schroeder (1994), entre outros.

As cinzas pesadas, se comparadas com as cinzas volantes, possuem menor poder de causar reações pozolânicas. A quantidade e o tipo de carboneto presente na composição química das cinzas de fundo é que define o poder cimentante destas cinzas, e por estas possuírem uma baixa percentagem de óxido de cálcio é previsível que haja uma limitação no desenvolvimento de reações auto cimentantes. (DAWSON *et al.*, 1991)

Devido estes fatores, pode-se interpretar como uma justificativa para o baixo índice de uso deste tipo de cinza no Brasil e no mundo. Com a baixa taxa de reutilização das cinzas de

fundo, estas quando produzidas nas usinas termelétricas são depositadas em bacias de decantação, enquanto as cinzas volantes são vendidas como matéria-prima para outras indústrias (FARIAS, 2005).

Segundo Farias (2005) e Schroeder (1994), a utilização deste tipo de cinza na engenharia rodoviária é realidade a algum tempo, em países como Estados Unidos e Canadá, nas rodovias não estaduais, subprodutos da queima do carvão e de processos de incineração tem sido bastante aplicado. A Tabela 6 mostra alguns locais onde foram feitas essas aplicações de materiais residuais em serviços de pavimentação.

**Tabela 6** - Locais onde foram aplicadas cinzas com outros materiais na pavimentação.

<b>Projeto</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Materiais</b>
<b>Route 2 Moundsville, W. VA. (1972)</b>	6,4 km  Base granular 22,9 cm	404.000 m  3225.000 tons	Escória de alto forno: 80 – 85%  Escória de caldeira primária: 10 – 15%
<b>Interstate 79 Bridgeport, W VA. (1972)</b>	5,6 km  Base granular 22,9 cm	161.000 m <sup>3</sup>  178.000 tons	Cinza pesada – 100%
<b>Highway 18 Saskatchewan, Canadá (1976 e 1977)</b>	2,9 km  Base granular 53,3 cm	32.000 m <sup>3</sup>  35.000 tons	Mistura de cinza pesada retirada de lagoa cinza pesada de pilha e cinza volante
<b>Highway 47 Estevan, W. VA. (1977)</b>	25,7 km  Base granular 25,0 cm	135.000 m <sup>3</sup>  150.000 tons	Mistura de cinza pesada retirada de lagoa cinza pesada de pilha e cinza volante
<b>Subdivision Development Cartersville, GA (1892)</b>	Base granular 10,1 cm	1150 m <sup>3</sup>	Cinza pesada

Fonte: Schroeder, 1994 apud Farias 2005.

Schroeder (1994) afirma que as cinzas pesadas podem ser classificadas como um material adequado na sua utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos, e ainda como material fino para ser utilizado em misturas asfálticas.

Segundo Leandro (2005), os fatores que mais influenciam para que as misturas de cinza de fundo em base e sub-base de pavimentos tenham suas propriedades alteradas são: teores de cinza, tempo de cura, teor de cal (caso este faça parte da mistura) e o tipo de solo.

O autor ainda observou em sua pesquisa que a utilização de cinzas pesadas em solos não lateríticos é mais benéfica que em solos lateríticos, além de verificar que o tempo de cura influencia apenas nos parâmetros de resistência da mistura quando a cal também é adicionada.

A estabilização de solos com a utilização de cinza de fundo aumenta a capacidade de suporte do solo em até 20% se comparado ao solo natural com adição de cal, conforme verificou Farias (2005) em sua pesquisa. Este ainda sugere a utilização da mistura solo-cinza de fundo-cal para rodovias de baixo volume de tráfego, dado que nestas a deformabilidade da estrutura não possui tanta importância para o desempenho do pavimento.

Na pesquisa feita por Lopes (2011) este adicionou, a um solo do Rio de Janeiro, cinzas de carvão mineral (volante e de fundo) para analisar seu comportamento, utilizou diversas proporções de teores de aplicação: para cinza volante 10 e 20%, para cinza de fundo 30 e 40%, e ainda analisou quando adicionado 3% de cal às cinzas.

Ao final do trabalho, Lopes (2011) concluiu que ao adicionar cinzas aos solos estudados, sejam de fundo ou volantes, com e sem adição de cal, houve uma melhoria em grande parte das propriedades mecânicas do material, onde ele encontrou um teor de cinza ótimo próximo a 7%.

Assim comprovou-se que ao utilizar cinzas de carvão mineral em misturas com solo para aplicação em base de pavimentos é benéfico, tanto para o meio ambiente quanto para a engenharia de pavimentos, dado que o solo que era considerado inadequado para pavimentação passou a ser classificado como adequado para esta finalidade.

### 3. METODOLOGIA

O estudo realizado se trata de uma revisão literária e pesquisa bibliográfica, de caráter qualitativo, buscando entender, examinar e esclarecer os procedimentos e efeitos do uso de diversos estabilizantes químicos para melhoramento de solos, tratando de temas como, alteração das propriedades do solo através do uso do estabilizante, estabilidade volumétrica, aumento da resistência, permeabilidade, durabilidade, dentre outros aspectos.

O levantamento bibliográfico englobou a produção científica no que diz respeito ao tema da utilização de estabilizantes químicos com a finalidade de melhoramento de solos. Procurou-se artigos desta área, mais precisamente os relacionados à área de geotecnia e construção civil, e livros que fazem referência ao tema proposto.

Os materiais escolhidos para serem utilizados foram classificados através de sua relevância, foco do trabalho e tipo de documento (artigo científico, livro, dissertação e tese).

Para o levantamento de teses e dissertações utilizadas neste trabalho, fez-se a pesquisa sobre os trabalhos de mestrado, doutorado e pós doutorado, que abrangessem o tema proposto, presentes nos repositórios dos sites das universidades onde tais pesquisas foram realizados. Também foram consultadas as bases de dados de acesso livre como SciELO, órgãos e associações federais.

Os artigos que continham em seu título, ou resumo, o tema escolhido ou suas derivações (os métodos químicos de forma individual) foram selecionados. Tais artigos foram estudados através da leitura de seu conteúdo para averiguar de que forma os métodos químicos de estabilização de solo estavam sendo empregados no âmbito da construção civil. A busca foi realizada em dois idiomas principais, o inglês e o português.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 RESULTADOS DE PESQUISAS EXPERIMENTAIS REALIZADAS COM MISTURA DE SOLO-CIMENTO

Como já especificado, a utilização do cimento como mistura para melhoramento de solos, apesar de ser mais efetiva em solos arenosos pela falta de argila, é indicada para todos os tipos de solo, assim usaremos alguns resultados de pesquisas experimentais para analisar os resultados obtidos nas mudanças das propriedades físicas dos solos pela utilização deste material.

Para a resistência a compressão simples, foi notado que independentemente do tipo de solo, imerso ou não em água, o aumento do teor de cimento usado nas misturas resultou no aumento do RSC.

Parente (2002) utilizou dois tipos de solo, o solo 1 foi classificado como sendo arenoso laterítico pelo método de classificação MCT, e SC pelo SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), e o solo 2 como sendo arenoso não laterítico pelo método de classificação MCT, e também SC pelo método SUCS.

Considerando os corpos de prova sem e com imersão prévia em água, quando o teor de cimento foi elevado de 4% para 7% o ganho de resistência foi da ordem de 106% e 207% para mistura constituídas respectivamente dos solos laterítico e não laterítico. Ao aumentar o valor da porcentagem de cimento utilizado de 7% para 10% o ganho foi da ordem de 41% e 37% respectivamente.

Com as misturas de solo-cimento submetidas à imersão, as perdas de resistência em relação à mistura seca foram de 26, 26 e 14% respectivamente para os tempos de cura de 3, 7 e 28 dias.

Cunha (2014) ao estudar os efeitos da utilização de cimento na mistura com um solo classificado como argiloso, do grupo A-7-5 conforme tabela para classificação dos solos TRB, averiguou que, após submeter corpos de prova à imersão durante quatro dias, as cargas máximas obtidas foram de 7,6 KN, para o solo in natura, e 125,1 KN para a mistura de solo com 10% de cimento, constatando um valor muito inferior de carga máxima para o solo in natura.

Sanbonsuge *et al.* (2017) também verificou o aumento do RCS para misturas de solo-cimento ao estudar um solo classificado como A-2-4, pela classificação AASHTO, e arenoso laterítico (LA'), pelo método MCT, obteve um RCS em cerca de 1,7 MPa em 3 dias de cura, aos 28 dias de cura da mistura esse valor de RCS aumentou para cerca de 3,5 MPa.

Para um solo classificado como silte de baixa compressibilidade pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), Pereira (2012) obteve um aumento de cerca de 314% no valor de RCS após realizar uma mistura de 9% de cal com o solo estudado.

Podemos verificar na Tabela 7 resultados obtidos pelas pesquisas para a resistência a compressão simples da mistura solo-cimento.

**Tabela 7** - Aumento do RCS em misturas de solo-cimento.

Solo	Porcentagem de Cimento	Aumento do RCS	Pesquisa
Arenoso Laterítico	4% para 7%	106%	Parente (2002)
	7% para 10%	41%	
Arenoso Não Laterítico	4% para 7%	207%	
Laterítico	7% para 10%	37%	
Silte de baixa compressibilidade	9%	314%	Pereira (2012)

Fonte: Adaptado de Parente (2002) e Pereira (2012).

Para a resistência a tração por compressão diametral (RTCD), Parente (2002) obteve resultados de aumento no valor desta propriedade após o aumento sucessivo de cimento utilizada na mistura solo-cimento, ao elevar o teor de 4% para 7% a mistura teve um ganho na ordem de 199% e 163% para os solos laterítico e não laterítico respectivamente. E ao elevar o teor de 7% para 10% os ganhos foram da ordem de 25% e 43%, respectivamente.

Podemos verificar esse aumento de RTCD na pesquisa de Parente (2012) na tabela 8 a seguir.

**Tabela 8** - Aumento do RTCD e misturas de solo-cimento.

Solo	Porcentagem de Cimento	Aumento do RTCD
Arenoso Laterítico	4% para 7%	199%
	7% para 10%	25%
Arenoso Não Laterítico	4% para 7%	163%
	7% para 10%	43%

Fonte: Adaptado de Parente (2002).

Quando comparados os resultados de RTCD para o solo-cimento seco e o solo-cimento pós imersão, a perda de resistência se deu na ordem de 23%, 15% e 17% para os respectivos teores de 4%, 7% e 10% de cimento utilizado na mistura solo-cimento.

Também foi verificado o aumento do RTCD nos experimentos de Sanbonsuge (2017) onde os valores subiram de cerca de 0,25 MPa, quando a mistura tinha 3 dias de cura, para 0,45 MPa quando a mistura chegou a 28 dias de cura.

Em todos os casos das pesquisas consultadas que traziam os ensaios de compactação, após o cimento ser adicionado ao solo, a umidade ótima da mistura diminuiu em relação ao solo in natura, e a massa aparente seca aumentou, isso se dá pelo fato de o cimento ter massa específica maior se comparada aos solos.

Para o Índice de Suporte Califórnia (ISC), Tabosa *et al.* (2019) ao analisar um solo classificado como A-4 de acordo com a classificação HRB (Highway Research Bord), denominado como um solo siltooso, averiguou que o ISC deste solo in natura era de 13,05%, ao realizar os ensaios com uma mistura que continha 5% de cimento este valor subiu para 81,2%.

O autor confirmou que com a mistura o solo tornou-se apto até mesmo para ser aplicado em camadas de sub-base ou base, conforme índices exigidos pelo DNIT (2006) onde o ISC precisa ser maior ou igual a 20% para aplicação em sub-base e maior ou igual a 80% para aplicação em base.

Arrivabeni *et al.* (2018) testou em um solo classificado como areia argilosa, pelo método SUCS, o tratamento com 4% de cimento na mistura solo-cimento, ele obteve um aumento de mais de 300% do ISC em relação ao solo in natura. Essa resistência é resultado dos contatos pontuais gerados pelo cimento no solo, proporcionando ligações intergranulares e coesão aparente que garantem a resistência mecânica (ARRIVABEN *et al.*, 2018).

Os resultados das pesquisas utilizadas podem ser verificados na tabela 9 a seguir.

**Tabela 9** - Aumento do ISC em misturas de solo-cimento.

Solo	Porcentagem de Cimento	ISC	Pesquisa
Siltooso	0%	13,05%	Tabosa et al (2019)
	5%	81,20%	
Areia-argilosa	0%	56,40%	Arrivabeni et al. (2018)
	4%	> 300%	

Fonte: Adaptado de Tabosa (2019) e Arrivabeni (2018).

A expansão desses corpos de prova estabilizados com cimento se manteve em níveis baixos em todas as faixas, atendendo às especificações do DNIT (2006) para materiais de base e sub-base, esse fato se dá pela natureza mineralógica do cimento.

No módulo de resiliência, Parente (2002) verificou um aumento de cerca de 220% dessa propriedade após 28 dias de cura ao adicionar 4% de cimento na mistura solo-cimento. Os demais trabalhos consultados não verificaram o comportamento dessa propriedade ao utilizar cimento para estabilização dos solos.

#### 4.2 RESULTADOS DE PESQUISAS EXPERIMENTAIS REALIZADAS COM MISTURA DE SOLO-CAL

Através da bibliografia estudada sobre a mistura de solo-cal afim de estabilização, trataremos neste tópico a influência do tempo de cura da mistura cal com diferentes tipos de solo e como essa mistura afeta as propriedades físicas e mecânicas destes solos.

Inglês & Metcalf (1972, apud Sandroni, 2010) apresentam um estudo sobre a influência do tempo de cura e da quantidade de cal aplicada em diferentes tipos de solos. Os autores observaram que as taxas de ganho de resistência eram maiores em pedregulhos arenosos.

Para solos argilo-arenosos, Lovato (2004) percebeu que a partir dos 28 dias de cura, a mistura não exerce influências significativas nas propriedades mecânicas para este tipo de solo, tendo uma resposta mais rápida no aumento de resistências que outros tipos de solo onde demandam mais tempo de cura.

O tipo de cal utilizada também influenciou nos resultados, tendo a cal cálcica um melhor resultado de desempenho se comparada com a cal dolomítica, então este é um fator a se considerar no momento de escolher o tipo de cal a ser misturada, ainda que a cal dolomítica tenha otimizado e melhorado as propriedades do solo se comparado com solo in natura (LOVATO, 2004).

Em todos os trabalhos experimentais estudados nesta revisão, as misturas de solo-cal apresentaram uma redução de peso específico aparente seco máximo e aumento da umidade ótima de compactação.

Nos trabalhos vistos, como o de Souza (2014), Consoli *et al.* (2010) e Lovato (2004), pode-se perceber que a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento de quantidade de cal utilizada na mistura, esses resultados podem ser verificados na Tabela 10.



**Tabela 10** - Aumento do RCS para misturas de solo-cal.

Solo	Porcentagem de Cal	Aumento do RCS	Tempo de cura	Pesquisa
Argila pouco plástica arenosa	3% para 5%	133%	56 dias	Lovato (2014)
Argiloso	2% para 10%	244%	90 dias	Consoli et al. (1997)
Arenoso siltoso	10%	132%	4 dias	Souza (2014)

Fonte: Adaptado de Lovato (2014), Consoli et. al (1997 e Souza (2014).

Quanto a resistência à tração, todos os experimentos presentes nas referências confirmaram um aumento nesta propriedade, e também comprovaram que a relação Resistência a tração/Resistência a Compressão estava entre o intervalo dito médio registrado na literatura Nacional e Internacional, que seria um valor entre 0,10 e 0,15. Pode-se verificar os resultados dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral na Tabela 11.

**Tabela 11** - Aumento da RTCD das misturas de solo-cal.

Solo	Porcentagem de Cal	Aumento do RTCD	Tempo de cura	Pesquisa
Argila pouco plástica arenosa	3% para 5%	215%	56 dias	Lovato (2014)
Argilo arenoso	9%	380%	90 dias	Teixeira et al. (2018)

Fonte: Adaptado de Lovato (2014) e Teixeira et. al (2018).

Se mostraram satisfatórios todos os trabalhos estudados que estavam propostos a verificar de forma experimental o melhoramento de solo e a utilização da mistura solo-cal como camada de base ou sub base era de fato algo tecnicamente viável.

#### 4.3 RESULTADOS DE PESQUISAS EXPERIMENTAIS REALIZADAS COM MISTURA DE SOLO-BETUME

Pegando dois trabalhos distintos como o de Mühlbeier (2018) em que foram utilizados dois tipos de solo que, in natura, não atendiam às faixas granulométricas do DNIT, e o trabalho de Sant'ana (2009) em que utilizou solos tanto finos quanto concrecionários lateríticos,

podemos verificar algumas particularidades da utilização desse material independente da granulometria e caracterização do solo em que ele será aplicado.

Então, em solos finos, Mühlbeier (2018) percebeu que a utilização de emulsão asfáltica acarreta numa diminuição do Índice de Suporte Califórnia (ISC) conforme aumenta-se a porcentagem de emulsão asfáltica presente na mistura. Isso também ocorreu na pesquisa de Sant'ana (2009), onde o solo pedregulhoso laterítico, mesmo já possuindo um ISC alto teve uma queda no seu valor, bem como aconteceu no solo fino.

Então por esses fatos, tanto Sant'ana (2009) quanto Santos (2009), Mühlbeier (2018) e outros autores, chegaram à conclusão de que o CBR parece não ser adequado para a avaliação de misturas solo-emulsão.

O ensaio CBR foi criado para analisar solos e materiais granulares que não forem estabilizados com emulsão asfáltica. Ensaio como RCS (resistência a compressão simples) foram tidos como mais indicados para avaliação de misturas estabilizadas com ligantes químicos (SANT'ANA, 2009).

A diminuição do valor de ISC se dá porque a ruptura do ensaio CBR é realizada de uma forma em que a presença do ligante age de modo prejudicial, pois este ligante proporciona uma maior lubrificação e através da facilitação da mobilidade das partículas acarreta na queda de resistência aos deslocamentos. Ou seja, o ensaio CBR não se mostra adequado para avaliar o comportamento desse tipo de mistura (SANT'ANA, 2009).

Para a resistência à tração as pesquisas experimentais respaldam o aumento no valor dessa propriedade, Pacheco (2011) chegou à conclusão em seu trabalho que, ao utilizar dois solos, um com 0,07 Mpa de resistência a tração e outro que sequer possuía essa propriedade, estes após serem misturados com emulsão asfáltica chegaram aos valores de 0,38 e 0,12 Mpa de resistência respectivamente. Os resultados podem ser verificados na Tabela 12.

**Tabela 12** - Aumento da RTCD em misturas de solo-betume.

Solo	RTCD do Solo in natura (Mpa)	RTCD do Solo-betume (Mpa)
Siltoso (A-4)	0,07	0,38
Pedregulhos finos e Areia (A-1-b)	0,00	0,12

Fonte: Adaptado de Pacheco (2011)

O mesmo aconteceu com Santos (2009) que, ao estudar a mistura entre emulsão asfáltica e três tipos de solo (um predominantemente arenoso, um areno-argiloso e um argilo-siltoso) percebeu que a resistência a tração de todos os três teve um aumento conforme especificados na Tabela 13.

**Tabela 13** - Aumento da RTCD para misturas de solo-betume.

Solo	Aumento do RTCD
Arenoso	249%
Areno-argiloso	55%
Argilo-siltoso	9%

Fonte: Adaptado de Santos (2009).

O autor averiguou que o solo arenoso obteve um aumento de cerca de 165% e 249% para as condições sem cura e com cura da mistura respectivamente. Os resultados para o solo areno-argiloso são mais modestos, onde o aumento da resistência a tração foi de 18% e 55% para as condições com e sem cura da mistura. Para o solo argilo-siltoso o aumento foi de aproximadamente 4% e 9% para as condições com e sem cura da mistura.

Ao contrário do ISC, a resistência a compressão simples em solos finos aumenta conforme aumenta o teor de emulsão inicialmente, até cerca de 4%, após isso estes valores começam a cair, isso se dá pelo fato de que o acréscimo de emulsão no solo faz com que as partículas de asfalto se tornem muito espessas, diminuindo o atrito entre elas e consequentemente a resistência (MÜHLBEIER, 2018).

Experimentalmente, para a resistência à compressão simples, Santos (2009) analisou, para o solo predominantemente arenoso, que quando comparado o RCS do solo in natura e a mistura solo emulsão asfáltica, ambos após cura, houve um aumento de 185% desse valor.

Para o solo areno-argiloso, o aumento do valor do RCS entre o solo in natura e a mistura solo-emulsão asfáltica, ambos após cura, foi cerca de 21%. Para o solo com textura de material argilo-siltoso o aumento do RCS foi cerca de 71% se comparados o solo in natura e a mistura solo-emulsão asfáltica, ambos após a cura.

Os valores para aumento de resistência à compressão simples da pesquisa de Santos estão especificados na Tabela 14.

**Tabela 14** - Aumento da RCS para misturas de solo-betume.

Solo	Aumento do RCS
Arenoso	135%
Areno-argiloso	21%
Argilo-siltoso	71%

Fonte: Adaptado de Santos (2009).

O mesmo foi verificado no trabalho de Pacheco (2011) onde os dois solos estudados tiveram aumento do RCS, um em 16%, onde a resistência passou de 1,3 MPa para 1,51 MPa, e outro em 30%, onde a resistência passou de 0,2 MPa para 0,26 Mpa, estes valores podem ser observados na Tabela 15.

**Tabela 15** - Aumento da RCS para misturas de solo-betume.

Solo	Aumento do RCS
Siltoso (A-4)	16%
Pedregulhos finos e Areia (A-1-b)	30%

Fonte: Adaptado de Pacheco (2011).

Um dos importantes parâmetros para mensurar a efetividade da mistura solo-emulsão asfáltica é o módulo de resiliência (MR), onde verifica-se a rigidez da estrutura e a vida útil da mesma através da análise das tensões atuantes na mistura.

Sant'ana (2009) além de testar na condição seca o comportamento do módulo de resiliência de dois tipos de solo, o 090, que foi caracterizado como um solo fino, e o 424, que foi caracterizado como concrecionário laterítico, testou também na condição “frente úmida”.

No solo 424 a mistura solo-emulsão na forma seca obteve resultados pouco maiores para o módulo de resiliência quando comparado ao solo in natura, mas o maior diferencial foi quando estes corpos de prova foram submetidos à imersão, onde o solo in natura obteve uma queda considerável de MR, e na mistura solo-emulsão isso não aconteceu.

No solo fino (090) foi verificada uma queda pós imersão da mistura, concluindo que a utilização desse tipo de estabilização, para ambientes que possuem forte ação das intempéries da chuva, em especial para tipos de solo com características geotécnicas como as da amostra 424 da pesquisa em questão, torna-se efetiva.

Aranciaba (2008) fez pesquisas experimentais com dois solos lateríticos (LA' e LG') e verificou a importância de imergir a mistura em água para que se destaque a efetividade da incorporação de emulsão asfáltica nas propriedades mecânicas da mistura solo-emulsão.

Foram constatados na pesquisa aumentos acima de 300% nos valores de MR na condição de imersão, entre os corpos de prova de solo com 0% de emulsão e 6% de emulsão incorporada, utilizando 28 dias de cura.

Pacheco (2011) percebeu o aumento do MR também em sua pesquisa, onde utilizou o solo 1, um solo siltoso de classificação A-4 (AASHTO) e o solo 2, um solo composto por fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia, classificado como A-1-b (AASHTO).

Ele analisou estruturas compostas por base e subleito, sendo a base em um caso o solo in natura e no segundo caso o solo com emulsão. Para o solo 1 obteve-se um aumento de MR em cerca de 192%, e para o solo 2 obteve-se um aumento em cerca de 134%. Em ambos os casos foi perceptível a diminuição do valor da tensão que chegou ao topo do subleito após o solo-emulsão ser utilizado na base no lugar do solo in natura.

Podemos verificar o aumento no Módulo de Resiliência nas pesquisas citadas na Tabela 16 abaixo.

**Tabela 16** - Aumento no MR das misturas de solo-betume.

Solo	Aumento no Módulo de Resiliência	Pesquisa
Siltoso	192%	Pacheco (2011)
Pedregulho fino e areia	134%	
Argilo-siltoso	300%	Aranciaba (2008)

Fonte: Adaptado de Pacheco (2011) e Aranciaba (2008).

#### 4.4 RESULTADOS DE PESQUISAS EXPERIMENTAIS REALIZADAS COM MISTURA DE SOLO-CINZA DE CARVÃO

Uma das maiores dificuldades da utilização de cinza de carvão para estabilização de solos é que, no Brasil, ainda não existe legislação específica para as cinzas derivadas de carvão mineral, que, em termos práticos são classificadas como resíduos sólidos, e para sua utilização é necessária aprovação específica, em cada caso, além de monitoramento ambiental prolongado (LOPES, 2011).

Em seu trabalho, Lopes (2011) testou uma areia siltosa estabilizada com cinza volante e cinza de fundo, com e sem a presença de cal. Foi verificado que a presença de cinzas, independente do seu tipo, acarreta num aumento da umidade ótima do solo e diminuição da massa específica.

Nessa areia-siltosa foi verificado pelo autor o aumento do módulo de resiliência da mistura ao se utilizar cinza volante e cal, onde obteve-se um aumento de aproximadamente 150% para baixas tensões confinantes e algo em torno de 180% para altas tensões confinantes, na ocasião a porcentagem de material da mistura era de 70% solo, 27% cinza volante e 3% cal.

O autor concluiu que mesmo a cinza de fundo sendo menos recomendada para estabilização ainda assim obteve-se valores consideráveis em sua utilização, onde o aumento do módulo de resiliência foi de 150% para baixas tensões e 160% para altas tensões confinantes, a composição da mistura era de 60% solo, 37% cinza de fundo e 3% cal.

A mistura que apresentou maior ganho de MR foi a composição que possuía 90% de solo, 7% de cinza volante e 3% de cal, onde apresentou ganhos de 310% e 354% em baixos e elevados valores de tensão confinante, respectivamente, em relação ao solo in natura. Na mistura 80% solo, 17% cinza volante e 3% cal, os aumentos de MR foram 110% e 250% para baixas e altas tensões confinantes, respectivamente, em relação ao solo in natura.

Através das pesquisas estudadas como a de Lopes (2011), Farias (2005), Leandro (2005) dentre outras, os autores concluem que apenas a mistura de solo/cinza não configura uma estabilização tão efetiva, na ausência de cal não existe reações químicas entre solo e cinza, apesar de ainda assim ocorrer uma melhora no MR ao misturar solo e cinza de fundo, a presença da cal é necessária para que essa melhora seja considerável.

Farias (2005) realizou um estudo experimental em um solo do tipo A-5, do sistema HBR de classificação e de comportamento não laterítico argiloso (NG') pela classificação MTC. O solo in natura não poderia ser utilizado como camada de reforço de subleito ou mesmo como uma camada final de terraplenagem, devido seus valores de CBR e expansibilidade.

Ao adicionar cinza no solo, houve uma estabilização granulométrica do material, onde melhorou significativamente o comportamento geotécnico resultante no que diz respeito ao CBR e à expansibilidade. A capacidade de suporte (CBR) das misturas que possuíam 70% solo e 30% cinza, ou 50% solo e 50% cinza, foi superior a 20%, caracterizando assim a mistura como apta a ser utilizada como camada de sub-base, segundo a metodologia do DNER (1979).

Foi verificado ainda que a adição de cal nas misturas melhorou o comportamento geotécnico do material de forma considerável, de forma que os valores de CBR superaram 25%

em todas as misturas solo/cinza pesada estudadas. O maior valor obtido foi de 97,1% com a mistura 70% solo, 30% cinza e 4% cal.

Ao testar dois solos, um de distribuição argilo-arenosa (laterítico argiloso pelo método MCT) e um de distribuição areno-argilosa (Não laterítico argiloso pelo MCT), Leandro (2005) realizou ensaios de CBR para os solos tratados in-natura, apenas com cinza pesada e com cinza-cal.

O CBR do solo areno-argiloso in natura era cerca de 7%, ao adicionar cinzas em diversas porcentagens o pico do CBR chegou a 32% (o teor de cinza que atingiu esse valor foi de 45%), já este mesmo solo tratado apenas com cal obteve um nível de CBR em cerca de 37%, e ao adicionar cinzas, além da cal, o nível mais alto atingido de CBR foi cerca de 56% (a porcentagem de cinza utilizada foi de 22%).

Para o solo argilo-arenoso in natura o valor de CBR foi cerca de 43%, ao adicionar 25% de cinzas esse valor chegou a 50%, o que se considerou um ganho pequeno, após essa porcentagem de cinzas o valor de CBR apenas decresceu. Ao adicionar apenas a cal o CBR deste solo subiu para cerca de 76%, e ao adicionar cinzas juntamente com a cal o valor de CBR obteve pico de cerca de 107%, este valor foi obtido com um teor de 32% de cinzas.

Os resultados para aumento de Índice de Suporte Califórnia para solos estudados nos estados solo natural, solo-cinza de carvão, solo-cal e solo-cinza-cal se encontram na Tabela 17.

**Tabela 17** - Aumento do ISC para misturas de solo-cinza de carvão e solo-cinza e cal.

Solo	Mistura	ISC	Pesquisa
Não laterítico argiloso	Solo-cinza	>20%	Farias (2005)
	Solo-cinza e cal	97,10%	
Laterítico argiloso	Solo natural	43%	Leandro (2005)
	Solo-cinza	50%	
	Solo-cal	76%	
	Solo-cinza e cal	109%	
Não laterítico argiloso	Solo natural	7%	
	Solo-cinza	32%	
	Solo-cal	37%	
	Solo-cinza e cal	56%	

Fonte: Adaptado de Farias (2005) e Leandro (2005).

No quesito de expansão, Leandro (2005) verificou no solo laterítico argiloso in natura uma expansão igual a 0,35% e quando adicionado a cinza, num teor a partir de 25%, todos os valores foram abaixo de 0,04%, e quando adicionada a cal o solo com 0% de cinza obteve uma expansão de 0,02% e após a adição de cinzas juntamente com a cal este valor de expansão zerou.

Farias (2005) também obteve resultados satisfatórios para expansão em sua pesquisa com o solo não laterítico argiloso utilizando cinza pesada, onde a expansão do solo in natura que era de 3,6% caiu para 0,6% utilizando 30% de cinzas e 0% utilizando 50% de cinza. Ao utilizar apenas a cal no solo a expansão já caiu para 0,1% e ao combinar cal e cinza pesada este valor já caiu para zero na primeira proporção de 70% solo, 30% cinza e 4% de cal.

Para o solo não laterítico argiloso o solo in natura obteve expansão de 0,19%, ao adicionar cinzas, no teor a partir de 35%, esse valor caiu para 0,03%. Ao adicionar cal os resultados foram exatamente iguais ao solo laterítico argiloso.

A Tabela 18 mostra a continua diminuição da expansão obtidas por Farias (2005) e Leandro (2005) para os solos estudados em suas pesquisas.

**Tabela 18** - Diminuição da expansão das misturas de solo-cinza de carvão, solo-cal e solo-cinza e cal.

Solo	Mistura	Expansão	Pesquisa
Não laterítico argiloso	Solo natural	3,6%	Farias (2005)
	Solo-cinza	0,6%	
	Solo-cal	0,1%	
	Solo-cinza e cal	0%	
Laterítico argiloso	Solo natural	0,35%	Leandro (2005)
	Solo-cinza	0,04%	
	Solo-cal	0,02%	
	Solo-cinza e cal	0%	
Não laterítico argiloso	Solo natural	0,19%	
	Solo-cinza	0,03%	
	Solo-cal	0,02%	
	Solo-cinza e cal	0%	

Fonte: Adaptado de Farias (2005) e Leandro (2005).



Os resultados de todas as pesquisas estudadas para a resistência a compressão simples foram semelhantes, para diferentes tipos de solo, as adições crescentes de cinza aos solos provocaram a diminuição das resistências à compressão simples, sendo que, geralmente, as resistências são menores para as misturas com maiores quantidades de cinza.

Dessa maneira, constata-se que as adições de cinza não desencadeiam nenhum tipo de reação benéfica com o solo em relação à resistência à compressão simples, ocasionando a redução acentuada desse fator.

O que chama a atenção para essa propriedade física é que, para misturas submetidas à imersão, existe uma grande discrepância entre a resistência do solo seco (com e sem cal) e imerso, e quando o solo é misturado com cinza além da cal, apesar da resistência da mistura seca ser menor que a do solo in natura ou apenas solo-cal, esse valor não se torna discrepante.

Conclui-se que o solo-cinza-cal mantém uma resistência mais constante entre o solo seco e quando submetido à ação da água, o que num modelo prático torna-se interessante, dado que o solo estará submetido às intempéries do meio ambiente. Para a condição imersa, todos os resultados de solo-cinza-cal foram melhores que o solo apenas com cal ou in natura.

Analisando-se as resistências à compressão simples das misturas de solo-cinza-cal e das misturas de solo-cinza, pode-se constatar que os aumentos significativos de RCS ocorreram após a adição da cal. Desse modo, pode-se afirmar que há indícios de que esses ganhos maiores para as misturas de solo com cinza após adição de cal se devem às reações ocorridas, principalmente, entre os compostos de cinza e a cal (FABBRI & LEANDRO, 2009).

Para as propriedades de resistência à tração simples, a literatura respalda que, ao adicionar cinzas ao solo, essa propriedade é prejudicada, e com a adição da cal, além de cinzas, essa propriedade tem uma perda bem menos significativa.

Por esse respaldo e unanimidade da literatura, foi averiguado que apenas um dos estudos consultados neste trabalho realizou o comparativo entre a resistência a tração simples de solo-cinza/solo-cinza-cal e solo in natura.

Leandro & Fabbri (2009) constataram que realmente a propriedade foi prejudicada quando as cinzas foram adicionadas ao solo, e que com a adição de cal a perda foi bem menos considerável para teores de cinza menores que 45%, a partir deste valor o ganho em relação ao solo apenas com cinza é pouco.

## 5. CONCLUSÃO

Durante a pesquisa bibliográfica e conforme os resultados demonstrados no capítulo anterior, foi averiguado que as aplicações destes métodos de estabilização são eficientes em diversos níveis de utilização e em diferentes tipos de solo, seja para utilização de base, sub-base ou apenas melhoramento de estradas não pavimentadas para aumentar as qualidades físicas e dispersão de material pulverulento.

Aqui houve-se uma preocupação em deixar claro quais os tipos de solo utilizados nas pesquisas consultadas e usar como referência diversas classificações de solo para tornar a pesquisa bibliográfica mais abrangente.

Os métodos menos convencionais são os tratamentos de solo com carvão mineral e emulsão-asfáltica, por isso foram melhor analisados nessa pesquisa, afim de compartilhar a maior quantidade de informações possíveis sobre esses dois métodos para assim difundir conhecimento e coloca-los em pauta.

Diante dos estudos analisados, para estes métodos menos convencionais, principalmente solo-carvão, a dificuldade da utilização desse material se encontra na falta de normas técnicas que regulamentem esse tipo de processo, e quais parâmetros devem ser analisados, o que os autores acabam fazendo é utilizar a norma de outros tipos de métodos, como os parâmetros exigidos pelo DNER para estabilizações de solos com a cal.

A maioria dos estudos práticos analisados abordou ensaios para determinação de parâmetros das propriedades físicas para cada tipo de mistura, seja de solo-cimento, solo-cal, solo-betume ou solo-carvão, o que chama a atenção é a não uniformidade entre os tipos de ensaios realizados para pesquisas que analisam o mesmo tipo de mistura, onde alguns analisam certos parâmetros de propriedades físicas e outros não.

O que foi verificado com unanimidade entre as pesquisas estudadas, independente de qual método estivesse sendo avaliado, é a importância do tempo de cura para as misturas, os resultados de aumento de propriedades físicas eram melhores quando o tempo de cura era maior.

Outro fator importante das pesquisas é o fato da maioria delas analisar, além da mistura seca, as propriedades físicas destas sob imersão, simulando uma situação em que o solo estaria sob efeito da ação da água, o que é importante para entender como ele irá reagir na prática, pois estará sujeito a este tipo de intempérie.

De modo geral, foi possível verificar neste trabalho os principais pontos de atuação e melhoramento de propriedades provenientes de cada método, e além disso, a importância de se

combinar estes métodos para extrair o melhor modo de melhoramento de solo, como ocorre no método de solo-cinza de carvão, onde a adição de cal torna-se importante para a efetividade do método, extraindo o melhor benefício ao meio ambiente e à engenharia de transportes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4223: standard practice for preparation of test specimens of asphalt - stabilized soils**. Pennsylvania, 2006.
- ARANCIBIA, S., D. A.; PARREIRA, A. B. **Estudo da resistência e do módulo de resiliência de solos lateríticos com a adição de emulsão asfáltica**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 22., Fortaleza. Anais: ANPET, 2008.
- ARRIVABENI, B. S., **Alternativas para estabilização granulométrica e química de solo de estradas florestais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, 2017.
- ARRIVABENI, S. B.; MACHADO, C. C.; SILVA, C. H. DE C.; SANT'ANA, G. L. **Estabilização granulométrica e química de solo de estradas florestais através do uso de cimento**. Anuário do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, setembro, 2018.
- ASPHALT ACADEMY. **Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials**. 2ª. ed. Pretoria: Asphalt Academy, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE PETRÓLEO - ABEDA. **Manual básico de emulsões asfálticas**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.
- ATTOH-OKINE, N.O. **Lime Treatment of laterite soils and gravels – revisited**. Construction and Building Material, 1995.
- AZEVÊDO, A. L. C. **Estabilização de solos com adição de cal – um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem após a adição de cal**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2006.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo. **DER-SP 307 base e sub-base de solo asfalto**. São Paulo, 1988.
- BRASQUIMICA, **Emulsões Asfálticas para Pavimentação**. Disponível em: <[https://www.brasquimica.com.br/informacoes-tecnicas/prg\\_pub\\_det.cfm/emulsoes-asfalticas-para-pavimentacao](https://www.brasquimica.com.br/informacoes-tecnicas/prg_pub_det.cfm/emulsoes-asfalticas-para-pavimentacao). Acesso em: 17 de mar, 2012> Acesso em 17 de mar, 2020
- BRAZETTI, R. **Sobre o expansivo mercado de aditivos patenteados para estabilização de solos: 33a Reunião anual de Pavimentação**. Research Gate, Florianópolis, 16 p., jan. 2001.

- BRITO, L.C; PARANHOS, H.S. **Estabilização de solos**. 6. ed. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, 11 p. 2017.
- CABRAL, G. L. L. **Metodologia de produção e emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.
- CASTRO, L. N. **Reciclagem a frio “in situ” com espuma de asfalto**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- CASTRO, C. A. **Estudo da técnica anti-pó com emulsão de xisto em pavimentos para baixo volume de tráfego**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2003.
- CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação**. 1<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2015
- CERVO, A. L. BERVIAN, P. A. **Metodologia científica**. 5.ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002.
- CONSOLI, N.C., THOMÉ, A. and CERATTI J.A.P., **Engineering properties of organic soft soil-lime mixtures**. Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, Balkema, 1997.
- CORRÊA, J. F. **Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2001.
- CUNHA, V. M. **Avaliação experimental da mistura solo-cimento para aplicação em camadas de base de pavimentação**. Centro Universitário de Brasília. Trabalho de conclusão. Brasília, 2014.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM, **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, DNER, 1996.
- DAWSON, A. R., NUNES, M. C. M. **Some British Experience of the Behavior of Furnace Bottom Ash and Slate Waste for Pavement Foundations**. Symposium Proceedings - Recovery and Effective Reuse of Discarded Materials and Byproducts for Construction of Highway Facilities, October, 1993.
- EADES, J. L., GRIM, R.E. **A quick test to determine requirements for lime stabilization**. Highway Research Record. 139, Highway Research Board, Washington, D.C., 1966.

- FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. **Movimentos de massa uma abordagem geológica / geomorfológica.** In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (Eds.) Geomorfologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 3: 123-194. 2010.
- FUNDAÇÃO DOM CABRAL. **Custos logísticos no Brasil. 2017.** Disponível em: < <https://www.fdc.org.br/conhecimento/publicacoes/relatorio-de-pesquisa-33324>. Acesso em: 25/02/2021. >
- GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do Agropólo do baixo Jaguaribe - CE.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
- GUIMARÃES, R. C., FERREIRA, C. J., ROSA, J. B. **Estabilização de solos com cal para uso em pavimentação e barragens.** UEG, Anápolis, GO, 2006.
- HIRAMATSU, Y. F. **Pavimentação asfáltica no Brasil e nos Estados Unidos da América.** Dissertação - Curso de Graduação em Ciências Militares, Academia Militar das Agulhas Negras (AMAN). Rio De Janeiro, 2020.
- INGLES, O. G., METCALF, J. B. **Soil Stabilization: Principles and Practice.** Butterworth-Heinemann Ltd. 384 p. April, 1973.
- JACINTHO, E.C., CARVALHO, J.C., FARIAS, M.M., GUIMARÃES, R.C. **Influência das propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo no comportamento de misturas solo-emulsão.** In: 36º Reunião anual de pavimentação, Curitiba, PR. Agosto, 2005.
- KÉZDI, A., **Stabilized earth roads.** Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam – Oxford – New York, 1979.
- LEANDRO, R.P.; FABBRI, G. T. P. **Aproveitamento da cinza pesada de carvão mineral na construção de bases e sub-bases de pavimentos flexíveis.** São Carlos, São Paulo, 2009.
- LIMA, D. C.; ROHM, S. A.; BARBOSA, P. S. A. **A estabilização dos solos III: Misturas solo-cal para fins rodoviários.** Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 1993.
- LOPES, L. D. S. E., **Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos.** Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- LOVATO, R. S.; **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação.** Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2004.
- MACHADO, C. C.; SANT'ANA, G. L.; LIMA, D. C.; CARVALHO, C. A. B.; ALMEIDA, A.; OLIVEIRA, T. **Durabilidade De Solos Estabilizados Quimicamente Com Vistas À Aplicação Em Estradas Florestais.** Revista Árvore, v. 30 no 6, Viçosa, Minas Gerais, 2006.

- MAKUSA, G. P. **Soil stabilization e methods and materials: In engineering practice**. 38p. Dissertação – Departamento de Engenharia Civil, Ambiental e de Recursos Naturais, Luleå University of Technology. Luleå, Sweden, 2012.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia do trabalho científico: procedimentos básicos, pesquisa bibliografia, projeto e relatório, publicações e trabalhos científicos**. 6.ed. São Paulo: Atlas, 2006.
- MEDINA, J. **Apostila de estabilização de solos**. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1987.
- MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., **Apostila de estabilização de solos**. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- MICELI JUNIOR, G., **Comportamento de solos do Estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia-IME. Rio de Janeiro, 2006.
- MIRANDA, J. L.; ARANTES, N. C. **Estudo de estabilização química de solos com adição de cal para pavimentação**. Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, 2019
- MOREIRA, E. D. **Desempenho de dois trechos de solo emulsão em vias de baixo volume de tráfego**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.
- MOREIRA, E. D. **Estabilização betuminosa de uma base ou revestimento primário como alternativa para pavimentação de vias urbanas de baixo volume de tráfego**. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 13., 2006, Maceió. Resumo dos trabalhos. Maceió, 2006.
- MÜHLBEIER, C. H., **Avaliação da utilização de solo betume em camadas de pavimentos de baixo tráfego na região noroeste do Rio Grande do Sul**. Dissertação (UNIJUÍ). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2018.
- NARDI J. V. **Estudo do efeito de aditivos na estabilização de solo arenoso com cal e cinza volante**. In Anais do V COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, São Paulo, SP, Out. 1974.
- NASCIMENTO, R. R. **Utilização de agregados de argila calcinada em pavimentação: uma alternativa para o estado do Acre**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- PACHECO, L. M. **Solos estabilizados com emulsão asfálticas para uso em pavimentação: estudo laboratorial**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

- PARENTE, E. B. **Avaliação do comportamento mecânico das misturas de solo-cimento e fosfogesso e cimento para uso na construção rodoviária.** Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.
- PATRICIO, J. D. **Estudo de solos modificados por adição de polímeros para uso em pavimentos rodoviários.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2015.
- PEREIRA, K. L. DE A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Tese de Mestrado. Natal, 2012.
- PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- PINTO, S. PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis.** 2 ed. Rio de Janeiro: Copiarte. 269 p. ISBN 85-902537-1-6. 2002.
- PETROBRÁS DISTRIBUIDORA S.A. **Manual de Serviços de Pavimentação,** 1996.
- PIRES, G. M. **Estudo da estabilização granulométrica e química de material fresado com adição de cimento portland e cinza de casca de arroz para aplicação em camadas de pavimentos.** Universidade Federal de Santa Maria, Tese de Mestrado. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2014.
- RODRIGUEZ, T. T.; WEISS, L. A.; TEIXEIRA, R. S.; BRANCO, C. J. DA C. **Permeabilidade de solo laterítico por diferentes métodos.** Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 36, n. 2, p. 17-32. 2015.
- Rogers, C.D.F., Glendinning, S., Roff, T.E.J. **Lime modification of clay soils for construction expediency.** Proceedings of the Institute of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 1997.
- SANBONSUGE, K. **Comportamento mecânico e desempenho em campo de base de solo-cimento.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Tese de Mestrado em Engenharia dos Transportes. São Paulo, 2013.
- SANDRONI, S., CONSOLI, N. C. **Sobre a Prática da Engenharia Geotécnica com Dois Solos Difíceis: Os Extremamente Moles e os Expansivos.** COBRAMSEG 2010. Anais. PP. 97–186. 2010.
- SANT'ANA, W. C. **Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de vias de baixo volume de tráfego para o Estado do Maranhão.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes. São Paulo, 2009
- SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B. **Estabilização dos solos com cal e betume.** In: 6º Reunião de pavimentação urbana, pp.74 – 97, Santos – São Paulo, Abril, 1995.



SARTORI, G. **Estudo De Estabilização De Solos Para Fins De Pavimentação Na Região De Campo Mourão**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Dissertação. Campo Mourão, 2015.

SCHROEDER, R. L. **The Use of Recycled Materials in Highway Construction**. U.S. Department of transportation, Federal Highway Administration (FHWA), 1994. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/94fall/p94au32.cfm>, acessado em 05/06/2020.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, T.O., CARVALHO, C. A. B., LIMA, D. C., CALIJURI, M. L., MACHADO, C. C., OLIVEIRA, T. M. **Avaliação do subleito de rodovias vicinais de baixo volume de tráfego por meio de ensaios geotécnicos**. Revista Árvore, Viçosa, Minas Gerais, v.35, n.4, p.825-833, 2011.

SOUZA, L. DOS S., ARNS, P. **Melhoramento das características mecânicas de um solo com adição do aditivo químico dynacal e reagente sulfato de alumínio**. Santa Catarina, 2015.

SOUZA, M. L. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis**. 1981. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/667\\_metodo\\_de\\_projeto\\_de\\_pavimentos\\_flexiveis.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/667_metodo_de_projeto_de_pavimentos_flexiveis.pdf), acessado em 21/02/2021.

TABOSA, J. H. R. DE C.; SILVA C. P. DA; LIMA, G. F. DE; SILVA, T. M. T. DA; SANTOS, T. C. DOS; ARAÚJO, R. **Tratamento de solo com adição de cimento portland: análise de propriedades para aplicação em pavimentação de baixo custo**. Braz. J. of Develop., v. 5, n. 12, p.28879-28895, Curitiba, dezembro, 2019.

TEIXEIRA, W. **Estabilização de um solo silte arenoso da Formação Guabirotuba com cal para uso em pavimentação**. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano COBRAMSEG 2018. Salvador, 2018.

VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Rio de Janeiro-RJ: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2010.

VOGT, J. C. **Estabilização Betuminosa**. 7º Simpósio sobre pesquisas rodoviárias, Rio de Janeiro-RJ, 1971.

YODER, E. J. **Principles of Soil Stabilization: Technical Report**. West Lafayette: Joint Highway Research Project. Indiana Department of Transportation and Purdue University, 1957.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. 2<sup>a</sup>. ed. New York: John Wiley & Sons, 1975.