

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV

NATALI DE OLIVEIRA PITZ

**COPRODUTOS INDUSTRIAIS COMO ALTERNATIVA NA ESTABILIZAÇÃO DE
SOLOS E ESTADO DA ARTE DO CONTROLE DE POEIRAS EM ESTRADAS
RURAIS**

LAGES

2022

NATALI DE OLIVEIRA PITZ

**COPRODUTOS INDUSTRIAIS COMO ALTERNATIVA NA ESTABILIZAÇÃO DE
SOLOS E ESTADO DA ARTE DO CONTROLE DE POEIRAS EM ESTRADAS
RURAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestra em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Jean Alberto Sampietro

Coorientadora: Prof. Dr.^a Maria Raquel Kanieski

LAGES

2022

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Pitz, Natali de Oliveira
COPRODUTOS INDUSTRIAIS COMO ALTERNATIVA NA
ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS E ESTADO DA ARTE DO
CONTROLE DE POEIRAS EM ESTRADAS RURAIS / Natali de
Oliveira Pitz. -- 2022.
64 p.

Orientador: Jean Alberto Sampietro
Coorientadora: Maria Raquel Kanieski
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2022.

1. Estabilização de solos. 2. Estradas não pavimentadas. 3.
Mecânica do solo. I. Sampietro, Jean Alberto . II. Kanieski, Maria
Raquel. III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de
Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Florestal. IV. Título.

NATALI DE OLIVEIRA PITZ

**COPRODUTOS INDUSTRIAIS COMO ALTERNATIVA NA ESTABILIZAÇÃO DE
SOLOS E ESTADO DA ARTE DO CONTROLE DE POEIRAS EM ESTRADAS
RURAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestra em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Jean Alberto Sampietro

Coorientadora: Prof. Dr.^a Maria Raquel Kanieski

BANCA EXAMINADORA

Orientador: _____

Dr. Jean Alberto Sampietro

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC – CAV)

Membro interno: _____

Dr.^a Raquel Valério de Sousa

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC – CAV)

Membro externo: _____

Dr.^a Carla Krulikowski Rodrigues Pelissari

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Lages, 29 de Agosto de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido a vida, e forças para que eu chegasse até aqui.

A minha família que não mediu esforços para que fosse possível concluir mais essa etapa, sempre me apoiando em todos os momentos.

Ao meu namorado, por estar sempre me acompanhando, apoiando e incentivando meu desenvolvimento.

Aos meus amigos e colegas de trabalho que sempre me acompanharam nos momentos bons e ruins ao longo dessa etapa, e principalmente a Amanda e o Luran sempre presentes nas conversas sérias e nos momentos de distração, o apoio de vocês fez e faz toda a diferença sempre!

Ao meu orientador Prof. Jean, por todas as orientações e conversas, sempre paciente e disposto a auxiliar em todos os momentos de dúvida, sempre transmitindo apoio e motivando nas dificuldades. E também a minha Coorientadora Prof. Maria Raquel, sempre pronta a ajudar e orientar em todos os momentos, sem vocês esse trabalho não seria possível.

A todos os amigos do LOPEF sempre presentes na execução das análises, inclusive nos finais de semana, agradeço por todo o empenho e dedicação de vocês.

A Universidade do Estado de Santa Catarina, pela oportunidade de realização do mestrado e execução deste trabalho.

A empresa apoiadora nessa pesquisa, por todo o apoio técnico e operacional na execução desse trabalho.

A todos que de alguma forma estiveram presentes na execução desse trabalho, deixo aqui registrada toda a minha gratidão!

“Para nós é essencial, como simples questão de sobrevivência, compreender a ciência. Além disso, a ciência é um deleite; a evolução nos fez ter prazer quando compreendemos – e os que compreendem têm mais probabilidade de sobreviver”. (Carl Sagan)

RESUMO

A formação de poeiras fugitivas nas estradas rurais e florestais não pavimentadas pode ser responsável por causar alguns problemas relacionados às condições de tráfego, aos veículos, e à saúde das pessoas que transitam por essas vias de acesso, causando principalmente problemas respiratórios em função das partículas de poeiras de menor tamanho, classificadas como poeira respirável. Dessa forma o objetivo deste trabalho é trazer uma breve revisão da literatura considerando o estado da arte do tema controle de poeiras em estradas rurais e florestais, além de testar o comportamento mecânico de solos e o efeito da adição de alguns coprodutos industriais e outros componentes já utilizados no controle e supressão de poeiras. No Capítulo I, a revisão da literatura foi realizada de forma sistemática, considerando-se as etapas: (1) busca na literatura; (2) seleção dos artigos; (3) extração dos dados; (4) síntese dos dados; e (5) redação dos resultados. Foram utilizadas as principais plataformas de busca de trabalhos científicos, das quais foram utilizados 99 artigos. Apesar de ser um tema com um acréscimo no número de publicações nas últimas décadas, ainda existem poucos trabalhos sobre o controle de poeiras em estradas não pavimentadas. Existem muitos assuntos a serem melhor explorados dentro do tema, como a comparação de metodologias para a mensuração e desenvolvimento de metodologias mais economicamente viáveis; comparação entre supressores comerciais; e, também, testes com coprodutos e outros componentes químicos que apresentem potencial. No Capítulo II, avaliou-se o comportamento de solos de duas áreas experimentais nos municípios de Lages e Correia Pinto, SC, onde foram coletadas amostras a partir das laterais e centro dos trechos das vias rurais. Na etapa 1, os solos foram caracterizados e agrupados quanto à composição granulométrica, enquanto na etapa 2, somente os grupos de solos de Lages foram misturados com coprodutos industriais mais outros componentes utilizados no controle e supressão de poeiras, testando-se os seguintes tratamentos: **T1** - Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal; **T2** - Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal; **T3** - Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits; **T4** - Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana; **T5** - Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana; **T6** - Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana. Foram realizados os ensaios de granulometria por sedimentação e peneiramento, consistência e curva de compactação na energia normal. Os tratamentos T1, T2 e T3 apresentaram redução no índice de plasticidade em ambos os tipos de solos dos dois grupos da área experimental de Lages variando de 8,1% a 5,4% no G3LG e 3,03% a 0,13% no grupo G4LG, aumento de até 0,08 g.cm³⁻¹ na massa específica aparente seca máxima dos solos do grupo G3LG. Os demais tratamentos (T4, T5 e T6) causaram aumento nos índices de plasticidade de até 39% no G4LG e 20% no G3LG e diminuindo a massa específica aparente seca máxima de compactação em até 0,2 g.cm³⁻¹ no G4LG. De maneira geral os tratamentos de 1 a 3 diminuíram os índices de plasticidade e aumentaram a massa específica aparente seca máxima de compactação se mostrando alternativas mais interessantes para utilização na estabilização de solos em relação aos tratamentos de 4 a 6.

Palavras-Chave: estabilização de solos; estradas não pavimentadas; mecânica do solo; poeiras fugitivas;

ABSTRACT

The formation of fugitive dust on unpaved rural and forest roads can be responsible for causing some problems related to traffic conditions, vehicles, and the health of people passing through these access roads, mainly causing respiratory problems due to dust particles. smaller dust, classified as respirable dust. Thus, the objective of this work is to bring a brief review of the literature considering the state of the art of dust control on rural and forest roads, in addition to testing the mechanical behavior of soils and the effect of the addition of some industrial co-products and other components already used in dust control and suppression. In Chapter I, the literature review was carried out systematically, considering the steps: (1) literature search; (2) selection of articles; (3) data extraction; (4) data synthesis; and (5) writing the results. The main search platforms for scientific papers were used, of which 99 articles were used. Despite being a topic with an increase in the number of publications in the last decades, there are still few works on dust control on unpaved roads. There are many issues to be further explored within the theme, such as the comparison of methodologies for measurement and development of more economically viable methodologies; comparison between commercial suppressors; and, also, tests with co-products and other chemical components that present potential. In Chapter II, the behavior of soils from two experimental areas in the municipalities of Lages and Correia Pinto, SC was evaluated, where samples were collected from the sides and center of the stretches of rural roads. In step 1, the soils were characterized and grouped in terms of granulometric composition, while in step 2, only the soil groups from Lages were mixed with industrial co-products plus other components used in dust control and suppression, testing the following treatments: T1 - Soil + 15% Fluidized Bed Sand + 5% Lime; T2 - Soil + 15% Fluidized Bed Sand + 5% Lime Mud; T3 - Soil+ 15% Fluidized Bed Sand + 5% Grits; T4 - Soil + 15% Fluidized Bed Sand + 5% Lime + 0.5% Sodium Polyacrylate + 1% Xanthan Gum; T5 - Soil + 15% Fluidized Bed Sand + 5% Lime Mud + 0.5% Sodium Polyacrylate + 1% Xanthan Gum; T6 - Soil + 15% Fluidized Bed Sand + 5% Grits + 0.5% Sodium Polyacrylate + 1% Xanthan Gum. The granulometry tests were carried out by sedimentation and sieving, consistency and compaction curve at normal energy. Treatments T1, T2 and T3 showed a reduction in the plasticity index in both soil types in the two groups in the experimental area of Lages, ranging from 8.1% to 5.4% in G3LG and from 3.03% to 0.13% in the G4LG group, an increase of up to 0.08 g.cm³-1 in the maximum density of the soils of the G3LG group. The other treatments (T4, T5 and T6) caused an increase in plasticity indices of up to 39% in G4LG and 20% in G3LG and reduced the maximum compaction density by up to 0.2 g.cm³-1 in G4LG. In general, treatments 1 to 3 reduced the plasticity indices and increased the maximum compaction density, proving to be more interesting alternatives for use in soil stabilization compared to treatments 4 to 6.

Key words: soil stabilization; unpaved roads; soil mechanics; fugitive dust;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Porcentagem de trabalhos relacionados ao tema “controle de poeiras em estradas não pavimentadas” nas últimas décadas.....	20
Figura 2. Porcentagem de assuntos abordados nas publicações relacionadas ao tema “controle de poeiras em estradas não pavimentadas”.....	21
Figura 3. Equipamento para mensuração de poeiras, desenvolvido por Etyemezian et al. (2003)	24
Figura 4. Dispositivo de medição de poeiras proposto por Addo e Sanders (2000).	26
Figura 5. Equipamentos para medição de poeiras segundo metodologia proposta por Gillies et. al (1999).....	27
Figura 6. Classificação dos supressores de poeiras segundo Parvej et al (2021).	29
Figura 7. Croqui de localização dos pontos e parcelas experimentais localizadas no município de Lages/SC.....	38
Figura 8. Croqui de localização dos pontos e parcelas experimentais localizadas no município de Correia Pinto – SC.	39
Figura 9. Curvas granulométricas obtidas por meio de análise de granulometria por peneiramento para os solos puros dos grupos: A) G1CP B) G2CP C) G3LG e D) G4LG.	46
Figura 10. A) e B) Curvas de Proctor para os solos dos grupos G1CP e G2CP respectivamente; C) e D) Curvas de Proctor para os solos dos grupos G3LG e G4LG respectivamente	48
Figura 11. Índices de plasticidade para os solos puros e diferentes tratamentos.	51
Figura 12. Curvas de compactação para os tratamentos de 1 a 6 do grupo G3LG.	54
Figura 13. Curvas de compactação para os tratamentos de 1 a 6 do grupo G3LG.	54
Figura 14. Massa específica aparente máxima de compactação para os solos puros e respectivos tratamentos dos grupos G3LG e G4LG.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos tratamentos considerados para teste.	40
Tabela 2. Percentual de areia, argila e silte, obtidos por meio de análise de granulometria por sedimentação para ambas áreas de estudo.	44
Tabela 3. Grupos de solo e suas respectivas porcentagens de areia, silte e argila, obtidos por meio de análise de granulometria por sedimentação.	45
Tabela 4. Coeficiente de Curvatura e Coeficiente de Uniformidade referente as curvas granulométricas de cada grupo de solos.	47
Tabela 5. Classificações de solos pelas metodologias SUCS e TRB para cada grupo de solo.	47
Tabela 6. Umidade Ótima e Massa específica aparente seca máxima estimadas por meio das curvas das análises de Proctor para ambas as áreas de estudo.	48
Tabela 7. Porcentagem de argila, areia e silte para os diferentes tratamentos.	49
Tabela 8. Resultados de limites de liquidez e plasticidade, e índice de plasticidade para os diferentes tratamentos testados.	51
Tabela 9. Umidade Ótima e Massa específica aparente seca máxima estimadas por meio das curvas das análises de compactação para os diferentes tratamentos considerando os solos da área II.	56

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. HIPÓTESES	14
1.2. OBJETIVOS	15
1.2.1. Geral.....	15
1.2.2. Específicos	15
2. CAPÍTULO I – CONTROLE DE POEIRAS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS: ESTADO DA ARTE	16
2.1. INTRODUÇÃO.....	17
2.2. METODOLOGIA.....	19
2.2.1. Busca e seleção das publicações	19
2.2.2. Análise dos dados	19
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
2.3.1. Quantidade de trabalhos e principais assuntos abordados	20
2.3.2. Fontes de emissão de poeiras fugitivas e problemas relacionados	22
2.3.3. Caracterização e mensuração de poeiras.....	24
2.3.4. Métodos utilizados na supressão de poeiras	28
2.4. CONCLUSÕES	34
3. CAPÍTULO II – COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS E EFEITO DE COPRODUTOS INDUSTRIAIS DA FABRICAÇÃO DE PAPEL E CELULOSE COMO ALTERNATIVA DE ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA.....	35
3.1. INTRODUÇÃO.....	36
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	38
3.2.1. Caracterização das áreas de estudo	38
3.2.2. Etapas de estudo.....	40
3.2.3. Ensaio laboratoriais	41
3.2.3.2. Agrupamento de solos com características similares	41

3.2.3.3.	Granulometria por peneiramento	42
3.2.3.5.	Limites de consistência	42
3.2.3.6.	Compactação do solo	43
3.2.3.7.	Classificação dos solos.....	43
3.2.4.	Análise dos dados	43
3.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
3.3.1.	Caracterização dos solos	44
3.3.2.	Comparação entre tratamentos.....	48
3.3.2.1.	Granulometria por sedimentação	49
3.3.2.2.	Consistência do solo.....	50
3.3.2.3.	Curvas de compactação em energia normal	53
3.4.	CONCLUSÕES	58
5.	REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

As estradas rurais têm grande importância para o escoamento da produção florestal e agrícola, além disso, são responsáveis também por trazerem benefícios sociais às comunidades por meio do acesso à mercados, serviços, empregos e informação. Portanto, o investimento em melhoria da rede viária rural traz ganhos para a atividade agrícola e florestal, mas também, tem impacto na melhora da qualidade de vida das comunidades que vivem no entorno e fazem uso destas vias (MACHADO et al., 2013; DIAS et al., 2015).

Desse modo, o planejamento adequado da construção de estradas rurais é crucial para o sucesso do setor florestal. Dentre as várias funcionalidades atribuídas às vias de acesso rurais de uso florestal, se pode elencar como a mais importante a manutenção do fluxo constante de transporte de madeira realizado por composições veiculares de carga, muitas vezes, extrapesados com peso bruto total combinado (PBTC) máximo legal de 74 t (PEREIRA et al., 2017).

Principalmente em estações chuvosas, a qualidade das estradas florestais é fator-chave para que sejam atendidas as demandas por parte das indústrias florestais no que diz respeito ao transporte de madeira que, muitas vezes, opera durante todo o ano. Por isso, as vias florestais devem ser construídas de acordo com determinados padrões técnicos, de forma que as composições veiculares possam trafegar sem interrupções, com segurança e conforto. Entretanto, estas vias, em sua maioria, não são pavimentadas, tendo, geralmente, sua camada superficial constituída por solo local, às vezes com mistura com agregado granular (SANT' ANNA, 2006).

Por apresentarem sua superfície exposta, essas estradas são sujeitas a um processo contínuo de deterioração, de modo que, o estado da superfície é dependente, diretamente, do tipo de solo, da capacidade de suporte, das solicitações do tráfego, das condições climáticas, dos dispositivos de drenagem presentes, da geometria da estrada e das atividades de manutenção e reabilitação correntemente utilizadas (SANT' ANNA, 2006).

Dentre os problemas mais comuns em estradas não pavimentadas, tem destaque a poeiras fugitivas oriunda da interação mecânica entre os veículos em movimento e o material presente na superfície da via. Do ponto de vista sanitário, econômico e de segurança, a geração de poeiras fugitivas representa uma série de problemas às pessoas que trafegam e vivem próximas à estas vias, uma vez que afeta significativamente a saúde da população promovendo o transporte de alérgenos, esporos e microorganismos, causando principalmente complicações respiratórias. Além disso, a poeiras fugitivas representa um maior risco de acidentes em função

da diminuição da visibilidade nas vias. Outros problemas como a maior deterioração das estradas também estão relacionados com a suspensão de poeiras (PARVEJ et al., 2021).

Para mitigar esse problema, dentre as técnicas mais utilizadas, está o emprego de supressores de poeiras ou estabilizadores químicos, os quais são mais amplamente adotados na prática. Os estabilizantes podem ser classificados em estabilizantes comerciais tradicionais, e em não tradicionais, em que no caso do segundo podem ser considerados os resíduos de diversos processos industriais (TINGLE, 2007). Os supressores de poeiras comumente empregados para controlar a poeiras fugitivas incluem água, cloreto de cálcio (CaCl_2), cloreto de magnésio (MgCl_2), entre outros. Já na categoria de estabilizantes não tradicionais, os resíduos industriais têm o potencial para utilização no processo de estabilização química do solo, sendo uma alternativa ambientalmente adequada, pois, muitas vezes, mesmos os resíduos não poluentes, são descartados em aterros decorrendo em passivos ambientais (VARGAS, 2018).

O desempenho dos supressores de poeiras varia dependendo das suas características físicas e químicas, taxas de aplicação, tipo de solo, velocidade do vento, condições atmosféricas, entre outros, o que reforça a necessidade de testes experimentais desses supressores em diversas condições de solo para atestar sua eficácia (PARVEJ et al., 2021).

Desta forma, este trabalho foi estruturado em dois capítulos, o qual visou (i) trazer uma breve revisão da literatura considerando o estado da arte do tema controle de poeiras em estradas rurais e florestais; e (ii) avaliar o comportamento mecânico de um solo típico da região serrana catarinense e o efeito da adição de coprodutos industriais com potencial ação de estabilização química para controle e supressão de poeiras fugitivas.

1.1. HIPÓTESES

- A maior parte dos trabalhos encontrados na revisão de literatura tratam de comparativos entre diversos supressores de poeiras comerciais ou oriundos da mistura de coprodutos e resíduos;
- Não existem trabalhos no Brasil comparando ou testando metodologias de mensuração e supressores de poeiras de poeiras em estradas não pavimentadas;
- Os tratamentos de solo contendo areia de leito fluidizado aumentarão a massa específica aparente seca máxima dos grupos de solos mais argilosos em função do maior tamanho de suas partículas, promovendo um melhor rearranjo de partículas nas misturas;

- Os tratamentos contendo componentes químicos utilizados em supressores de poeiras aumentarão a massa específica aparente seca máxima dos solos e diminuirão os índices de plasticidade em função de seus mecanismos de funcionamento (aglutinação e higroscopicidade).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Geral

Realizar uma breve revisão da literatura considerando o estado da arte do tema *controle de poeiras em estradas rurais e florestais*, e avaliar o comportamento mecânico de solos típicos da região serrana catarinense e o efeito da adição de coprodutos industriais com potencial ação de estabilização.

1.2.2. Específicos

- Revisonar a literatura em busca de discutir os principais assuntos abordados nos trabalhos cujo tema aborda o controle de poeiras em estradas não pavimentadas a partir da década de 1970;
- Caracterizar mecanicamente os solos de duas áreas experimentais localizados na serra catarinense, por meio da sua granulometria, limites de consistência e massa específica aparente seca máxima de compactação, possibilitando a comparação com as misturas (solos + coprodutos);
- Avaliar o comportamento mecânico de um solo e o efeito da adição de coprodutos industriais com potencial ação de estabilização química, por meio da comparação entre tratamentos de diferentes misturas de coprodutos, tendo como principais variáveis para comparação as porcentagens de areia, silte e argila, índices de plasticidade e massa específica aparente seca máxima do solo.

2. CAPÍTULO I – CONTROLE DE POEIRAS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS: ESTADO DA ARTE

RESUMO

A formação de poeiras fugitivas nas estradas rurais não pavimentadas é responsável por causar problemas relacionados às condições de tráfego e à saúde das pessoas que transitam por essas vias de acesso as quais podem sofrer de problemas respiratórios em função das partículas de poeiras de menor tamanho, classificadas como poeiras respirável. O objetivo deste capítulo é trazer uma breve revisão sobre o “controle de poeiras em estradas não pavimentadas”, abordando (i) fontes de emissão de poeiras; (ii) problemas relacionados à emissão de poeiras (iii) métodos de mensuração de poeiras; (iv) mecanismos de controle e produtos utilizados na supressão. Para a revisão foram consideradas etapas: (1) busca na literatura; (2) seleção dos artigos; (3) extração dos dados; (4) síntese dos dados; e (5) redação dos resultados. Foram realizadas buscas nas principais plataformas de trabalhos científicos, resultando em uma revisão bibliográfica de 99 artigos. Apesar de ser um tema com um acréscimo no número de publicações a partir da década de 1970, existe uma quantidade muito limitada de trabalhos sobre o tema de controle de poeiras em estradas não pavimentadas. Dos trabalhos analisados quase 40% deles se refere a metodologias de mensuração de poeira, entretanto os métodos apresentados consistem em sua maioria em aparatos de alto custo, além de não existirem comparações entre metodologias que tragam resultados práticos a nível operacional. De maneira geral, a grande maioria dos estudos traz experimentos utilizando cloretos de cálcio e magnésio como supressores mais amplamente utilizados, sendo muito menor a quantidade de trabalhos que avalia outros tipos de supressores. Apesar da recente preocupação em desenvolver fórmulas de supressores de alta eficiência ainda existe muito a ser explorado a respeito do tema, principalmente no que diz respeito ao desenvolvimento de supressores eficientes, que não apresentem riscos ambientais na sua utilização e que também sejam economicamente viáveis.

Palavras-chave: controle de poeiras, estradas não pavimentadas, poeiras fugitivas.

2.1. INTRODUÇÃO

Entende-se por poeiras fugitivas, aquela oriunda do atrito entre os pneus e/ou implementos dos veículos que trafegam por uma via não pavimentada ou gerada por meio da erosão eólica, de forma a desagregar essas partículas da superfície da estrada e formando então as partículas de poeiras fugitivas. A formação de poeiras fugitivas nas estradas rurais e florestais não pavimentadas, pode ser responsável por causar alguns problemas relacionados às condições de tráfego nessas vias, aos veículos, e à saúde das pessoas que transitam por essas vias de acesso, causando principalmente problemas respiratórios em função das partículas de poeiras de menor tamanho, classificadas como poeiras respirável. (KATRA, 2019; AZULBAID, 1999; HUANG et. al, 2020).

Outro problema ainda associado a emissão de poeiras fugitivas se refere a diminuição da quantidade de material fino que se perde por emissão de poeiras pode fazer com que essa camada de cascalho não seja coesiva o suficiente, resultando em um risco maior de agregados soltos e necessidade de manutenções mais frequentes (ALZUBAID, 1999; ADDO e SANDERS, 2000).

Diante das adversidades causadas pelo excesso de poeiras fugitivas nas estradas não pavimentadas, surge a necessidade de controle e supressão dessas poeiras, buscando a atenuação dos problemas decorrentes da mesma. Assim, uma das formas mais efetivas de realizar esse controle é por meio da estabilização química e mecânica dos solos dessas vias (BOGACKI *et al.*, 2018).

Pouco se sabe na pesquisa contemporânea sobre os materiais supressores de poeiras e seus mecanismos de trabalho, uma vez que revisões abrangentes sobre o tema ainda não estão disponíveis na literatura. Embora, do ponto de vista da aplicação em campo, seja necessário entender as características e o mecanismo de trabalho dos materiais supressores de poeiras, também é importante estar informado sobre o processo envolvido na síntese desses supressores (PARJEV et al., (2021).

Dentre os principais trabalhos disponíveis na literatura relacionados a controle e supressão de poeiras, são principalmente abordados os métodos de mensuração e as comparações entre os principais supressores já testados. Os métodos de mensuração podem variar de dispositivos móveis (ADDO; SANDERS, 2000; EMEZIAN, 2003) até estruturas estáticas que permanecem ao lado das vias para mensuração das poeiras (ALZUBAID, 1999; GILLIES, et al. 1999).

No que diz respeito aos principais supressores utilizados para controle de poeira, destacam-se como mais amplamente testados os cloretos de cálcio e magnésio, entretanto existem outros produtos comerciais além de resíduos e coprodutos de processos industriais que vem sendo testados para esse fim.

Assim, o objetivo deste capítulo é trazer uma breve revisão sistemática sobre o tema “controle de poeiras em estradas não pavimentadas”, apresentando os pontos mais importantes dos trabalhos de maior relevância relacionados ao tema, abrangendo assuntos como fontes de emissão de poeiras, métodos de mensuração, mecanismos de controle e produtos utilizados na supressão.

2.2. METODOLOGIA

Para a realização da revisão de literatura, foram consideradas as principais etapas segundo a metodologia citada por Galvão e Pereira (2014) sendo: (1) busca na literatura; (2) seleção dos artigos; (3) extração dos dados; (4) síntese dos dados; e (5) redação dos resultados.

2.2.1. Busca e seleção das publicações

De forma a contemplar todos os principais tópicos relacionados ao controle e supressão de poeiras, foram realizadas pesquisas nas plataformas *Scopus*, *Scielo*, no Portal de Periódicos da Capes e, também, pesquisas complementares no site de busca *Google Scholar*. Na busca foram utilizadas palavras-chave em língua portuguesa como “controle de poeiras”, “supressão de poeiras”, “supressores de poeiras” e, também, em língua inglesa, dentre os quais estão “*road dust*”, “*unpaved road dust*” e “*dust suppressants*”. Os termos para busca foram definidos a partir de uma pesquisa inicial nas mesmas bases, que teve por objetivo identificar quais palavras-chave trariam resultados associados ao tema pesquisado.

Foram considerados nessa pesquisa somente artigos científicos, uma vez que o número de dissertações e teses encontrados e relacionados ao tema era muito baixo. A partir da busca, foi realizada a leitura dos resumos dos principais trabalhos resultantes da pesquisa nas plataformas de busca, sendo selecionados para a análise somente os que possuíam de fato relação com o tema “controle e supressão de poeiras em estradas não pavimentadas”.

Como principais assuntos a serem discutidos no presente trabalho estão, a quantidade de trabalhos e os principais assuntos abordados dentro do tema, fontes e problemas relacionados a emissão de poeiras, metodologias utilizadas para quantificação e mensuração, comparações entre supressores de poeiras e mecanismos de supressão.

2.2.2. Análise dos dados

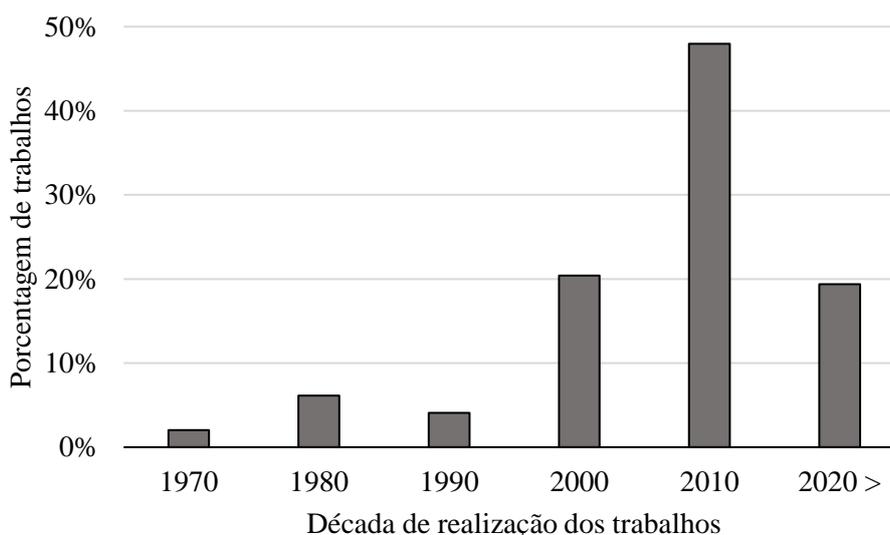
Os dados relacionados aos 99 artigos analisados foram organizados em uma planilha *Excel*, separando os trabalhos por local e data de publicação, assunto, e pontos relevantes para a discussão.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Quantidade de trabalhos e principais assuntos abordados

A partir da classificação dos trabalhos em função de suas datas de publicação, fica evidente o acréscimo de pesquisas relacionadas ao tema de controle de poeiras em estradas não pavimentadas nas últimas décadas (Figura 1). Entretanto, já havia a preocupação em estudar o tema desde a década de 1970, em que se destacam os trabalhos de Becker e Takle (1979) e Roberts, Watters, Mangold e Rossano (1975) que estudaram a estimativa de quantificação de poeiras por meio de modelos matemáticos e a avaliação dos custos e benefícios do controle de poeiras em estradas não pavimentadas, respectivamente.

Figura 1. Porcentagem de trabalhos relacionados ao tema “controle de poeiras em estradas não pavimentadas” nas últimas décadas.



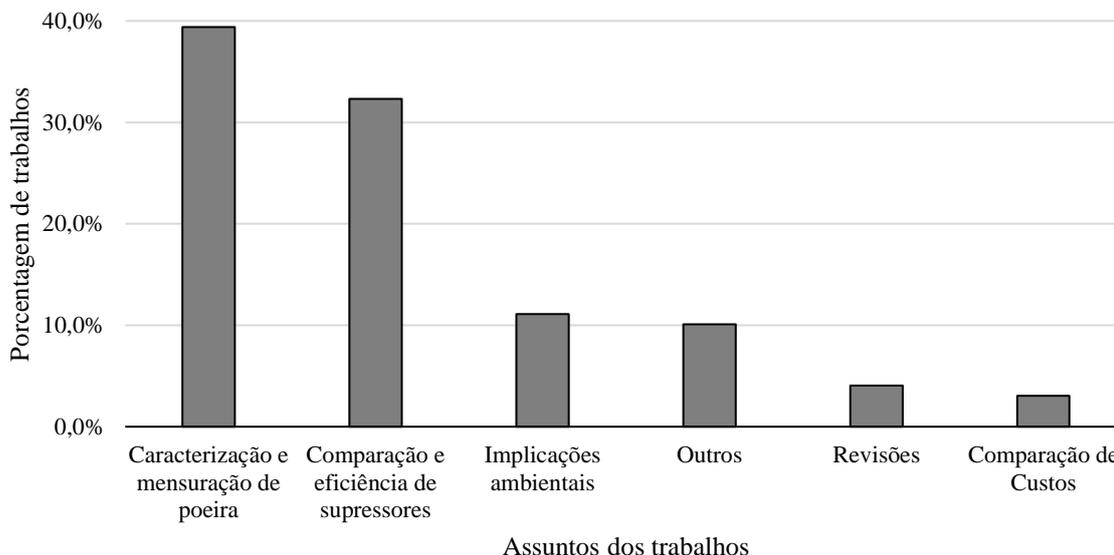
Fonte: a autora (2022)

Já a partir da década de 2010, o número de trabalhos representa mais da metade de todas as publicações relacionadas ao tema e publicados desde os anos 1970. Nos estudos mais recentes e, portanto, na maioria das publicações, uma variedade de assuntos é explorada dentro do tema principal, que compreendem comparação entre métodos de controle de poeiras, metodologias e equipamentos para a mensuração, impactos ambientais da emissão, entre outros.

Dentre os 99 artigos analisados, cerca de 40% tratam como assunto principal a caracterização de partículas de poeiras e também metodologias que se referem à mensuração e quantificação de poeiras em estradas; alguns trabalhos tratam ainda de estimativas de emissão

de poeiras por meio de modelos matemáticos. Em seguida, o segundo assunto mais encontrado como tema principal dos trabalhos se refere a experimentos voltados para a comparação entre diferentes supressores de poeiras, e ainda testes de eficiência de supressores isolados. O terceiro tema mais pesquisado diz respeito a implicações ambientais causadas pelo excesso de emissão de poeiras e ainda problemas ambientais que podem ser causados em função da utilização de métodos de supressão de poeiras por estabilizantes químicos por exemplo. Alguns outros trabalhos se referem a revisões bibliográficas sobre emissão de poeiras, comparação de custos em estratégias de supressão e controle de poeiras, otimização para gerenciamento de estradas não pavimentadas, entre outros (Figura 2).

Figura 2. Porcentagem de assuntos abordados nas publicações relacionadas ao tema “controle de poeiras em estradas não pavimentadas”



Fonte: a autora (2022)

Já no que diz respeito a localização da execução dos estudos analisados, a maioria foi realizada nos Estados Unidos (60,6%), com foco principalmente em suas regiões mais áridas. China, Índia e Israel vem em seguida, porém com um número bem menor de publicações. No Brasil foi encontrada apenas uma publicação, realizada no estado de São Paulo e tratando de emissões rodoviárias urbanas.

A importância da realização de trabalhos relacionados ao tema no Brasil é de grande importância, uma vez que, segundo a Confederação Nacional do Transporte, o Brasil possui 1.720.756 km de rodovias, dos quais apenas 1.509.288 km não são pavimentados, o que

representa 87,7% da extensão total (CNT, 2017), condição na qual a emissão de poeiras se caracteriza como um dos principais problemas para o tráfego.

2.3.2. Fontes de emissão de poeiras fugitivas e problemas relacionados

Nas estradas não pavimentadas, em condições de baixa umidade, a poeira que é gerada, surge da perturbação mecânica do material granular exposto ao ar. Esta poeira gerada é denominada "fugitiva" porque não é descarregada na atmosfera em uma corrente de fluxo confinado (EPA, 1995).

Segundo EPA (1995), o processo de geração de poeiras fugitivas em estradas não pavimentadas, é causado por dois fenômenos físicos básicos: (1) Pulverização e abrasão dos materiais de superfície por aplicação de força mecânica a partir de implementos (rodas, lâminas, etc.); (2) Arrastamento de partículas de poeiras pela ação de correntes turbulentas de ar, tais como a erosão eólica de uma superfície exposta por velocidades do vento acima de 19 quilômetros por hora (km/h).

As partículas de poeiras fugitivas que se despreendem das superfícies das vias estão incluídas no que é chamado de material particulado não-exaustor (PM), que pode ser definido como qualquer material particulado que tenha associação com transporte rodoviário e que além disso não seja emitido diretamente por meio do escapamento do veículo, englobando desgaste de pneus, freios, da superfície da via, entre outros. Desta forma as partículas de poeiras fugitivas podem ser classificadas de acordo com o tamanho de seus diâmetros, sendo que as partículas maiores com até 10 micrômetros de diâmetro são chamadas de PM10 e as partículas com até 2,5 micrômetros de diâmetros são chamadas de PM2,5 (HAN; YOUN; JUNG, 2011).

O principal problema relacionado envolve os riscos para a saúde em função da exposição a condições de excesso de emissão de poeiras, além de causar outros problemas como a diminuição da visibilidade da via, causando aumento no risco de acidentes. O que reflete na necessidade de preocupação seja por parte dos poderes públicos quanto de empresas rurais e florestais que atuam no país, em buscar alternativas para o controle de poeiras nas vias não pavimentadas.

A poeira fugitiva pode afetar significativamente a saúde principalmente causando problemas respiratórios, e ainda afetar a fauna e a flora presentes nas áreas próximas a estradas não pavimentadas, promovendo o transporte de alérgenos, esporos e microorganismos (PARVEJ, et al., 2021). Em um trabalho realizado por Wu et al. (2020) nos Estados Unidos, foi relatada uma associação positiva entre a exposição a longo prazo de PM2,5 e o aumento do risco de contaminação por coronavírus (COVID-19), em que um aumento de apenas 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

em O PM2.5 está associado a um aumento de 8% na taxa de mortalidade por COVID-19 nos Estados Unidos. Observou-se ainda que as partículas de poeiras mais finas agravam doenças cardíacas e pulmonares, como bronquite, pneumonite, sibilos, doença arterial cardíaca e arritmias cardíacas, o que pode aumentar o risco de morte.

Quando se espalha no ar em concentrações mais altas, a poeiras fugitivas não apenas afeta negativamente a qualidade do ar, mas também causa diminuição da visibilidade na estrada, levando ao aumento do risco de acidentes. Além disso, as perdas de material associadas à poeiras contribuem para o aumento da perda de cascalho e a necessidade de manutenção mais frequente nas estradas. Ao controlar esse pó, a taxa de perda de cascalho e gastos com manutenção pode ser significativamente reduzida (GIUMMARRA; FOLEY; CROPLEY, 1997; RUSHING et al., 2006; JONES; VITALE, 2008).

Apesar de se mostrar como um problema que traz riscos a saúde, aumentar os riscos de acidentes e ainda contribuir com a deterioração das vias, encontrar informações publicadas que estejam facilmente disponíveis e sejam fáceis de usar sobre o estabelecimento de um programa de melhoria de estradas não pavimentadas incorporando controle de poeira parece ser uma necessidade não atendida e preocupação para muitos gestores de estradas não pavimentadas. Conseqüentemente, os gerentes muitas vezes confiam em fornecedores e vendedores para orientação que, compreensivelmente, incentivarão o uso de seu produto mesmo que não seja a melhor solução para um determinado trecho da estrada (ALZULBAID, 1999).

Associado ao que Alzulbaid (1999) discute em seu trabalho, existem também questões operacionais que podem dificultar a execução das atividades de manutenção visando mitigar esses problemas nas vias. Jones et al. (2013) cita que relacionado ao orçamento necessário, junto com itens de linha típicos para construção e manutenção trabalho, os orçamentos de manutenção de estradas de vários anos também precisam incluir alocações para treinamento e retenção de funcionários qualificados, compra e depreciação de equipamentos e contratação de suprimentos de materiais de qualidade adequada. No entanto, existem nenhuma abordagem padrão para orçamentos de manutenção de estradas sendo seguida por gestores de estradas não pavimentadas.

Jones et al. (2013) traz ainda que as aplicações de supressores de poeiras, muitas vezes requerem uma metodologia diferente daquele ao qual a maioria dos operadores tem por prática habitual. E que portanto, após adquirirem experiência com os mecanismos de controle de poeira e solo estabilização, os operadores devem ajustar suas práticas evitando que custos desnecessários sejam gerados. E ainda, um dos maiores desafios encontrados na implementação

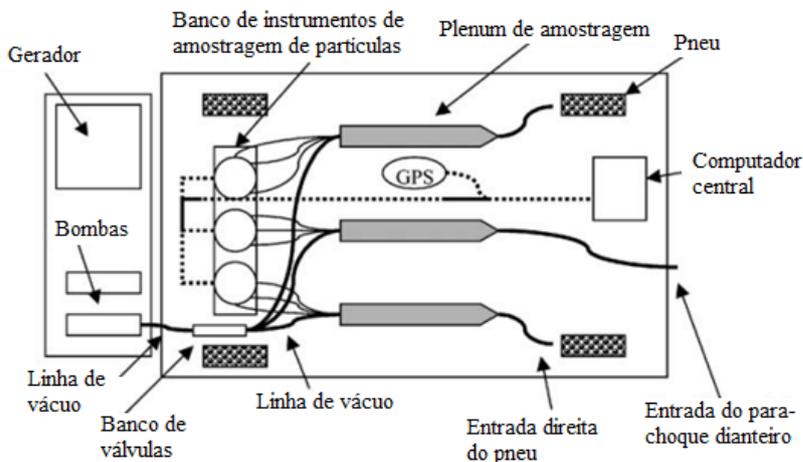
de novas técnicas é fazer com que todos (gerentes, superintendentes, supervisores, operadores, etc.) de fato compreendam a ideia e se comprometam com a resolução dos problemas.

2.3.3. Caracterização e mensuração de poeiras

Dentre os trabalhos analisados, cerca de 40% tratam apenas sobre caracterização e mensuração da poeira fugitiva no ambiente, sendo utilizados dispositivos móveis acoplados aos veículos, ou então estruturas estáticas posicionadas próximas aos trechos de interesse onde deverá ser realizada a mensuração.

Um dos métodos mais comentados em diversos trabalhos diz respeito ao *testing re-entrained aerosol kinetic emissions from roads (TRAKER)* ou teste de emissões cinéticas de aerossol reentrado de estradas (Figura 3). O equipamento é capaz de realizar a medição das emissões de partículas de PM₁₀ e PM_{2,5}. O TRAKER consiste em um veículo, equipado com três tubos de metal montados permanentemente que atuam como entradas para os equipamentos de bordo. Duas das entradas estão localizadas atrás dos pneus dianteiros esquerdo e direito e são usadas para medir as emissões de poeira da estrada desses pneus. A terceira entrada passa por baixo da carroceria da van e se estende por um orifício no para-choque dianteiro. Essa medição de concentração de PM além das duas localizadas atrás dos pneus é subtraída das medições atrás dos pneus esquerdo e direito para contabilizar as emissões de poeira e escape de outros veículos na estrada. Um receptor do sistema de posição global (GPS) fornece a posição, velocidade e aceleração do veículo TRAKER em intervalos de 1s. Todos os dados gerados pelos instrumentos TRAKER são coletados e exibidos por um computador de bordo em tempo real.

Figura 3. Equipamento para mensuração de poeira, desenvolvido por Etyemezian et al. (2003)

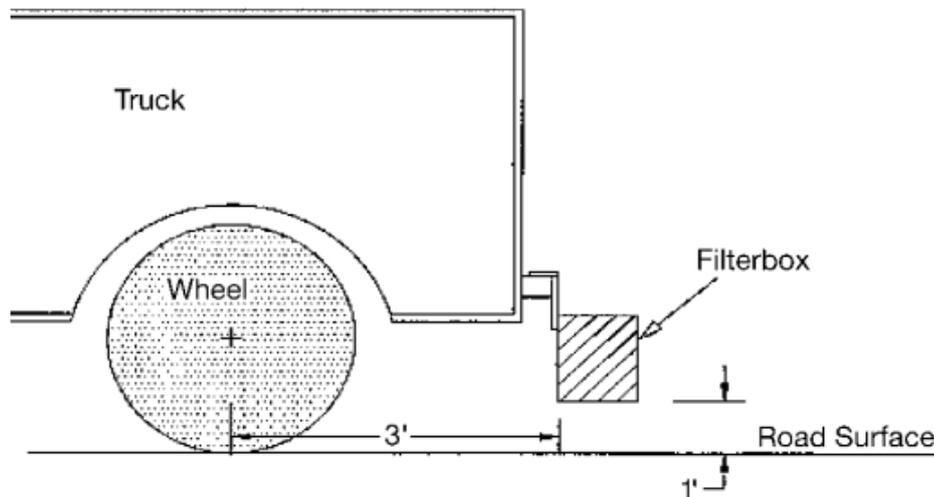


Fonte: Etyemezian et al. (2003)

A poeira é coletada pelas três linhas de entrada entram no compartimento de carga da van pela parte inferior da carroceria. A partir disso, a poeira passa por toda a estrutura apresentada na Figura 3 até chegar ao equipamento que de fato mede a quantidade de poeiras, o DustTrak nesse foi utilizado no trabalho em questão. São anexados dois DustTraks em cada uma das três entradas, um com entrada seletiva de tamanho 10 μm e outra com uma de 2,5 μm , e um Analisador de Tamanho de Partículas. O DustTrak é um monitor portátil que usa dispersão de luz de 90 partículas para inferir as concentrações de massa de PM, ele mede a massa do aerossol em uma faixa de concentrações de 0,001 a 150 mg/m^3 a uma frequência de 1 Hz e uma vazão de 1,7 lpm (ETYEMEZIAN, 2003). Segundo os autores, os resultados indicam que o TRAKER tem a capacidade de medir o potencial de emissão de poeiras de uma estrada com razoável repetibilidade. Embora existam perdas de linha, são relativamente pequenas e não comprometem a qualidade da medição.

Outro método bastante citado para quantificação da poeira é proposto por Addo & Sanders (2000) que propõem em seu trabalho um dispositivo experimental de medição de poeiras em estradas, chamado de “*dustometer*”. Os autores afirmam que o equipamento mede diretamente a massa de poeiras, enquanto outros dispositivos móveis medem a poeira indiretamente por meio da opacidade do ar. Além disso, a construção do equipamento é simples, de baixo custo e de fácil operação. O equipamento consiste em um gerador elétrico de 3.000 W, uma bomba de sucção padrão de alta volumetria (1/3 HP), uma caixa de metal que contém um papel de filtro de fibra de vidro, um suporte de metal preso ao para-choque do veículo, e um tubo flexível para conectar a bomba de sucção à caixa de filtro. A caixa do filtro é fixada rigidamente ao para-choque do veículo por meio do suporte atrás da roda traseira esquerda. O gerador e a bomba de sucção são fixados na carroceria do veículo (Figura 4). A caixa do filtro quando montada atrás do caminhão é alinhada horizontalmente com a roda traseira esquerda (ADDO; SANDERS, 2000).

Figura 4. Dispositivo de medição de poeiras proposto por Addo e Sanders (2000).



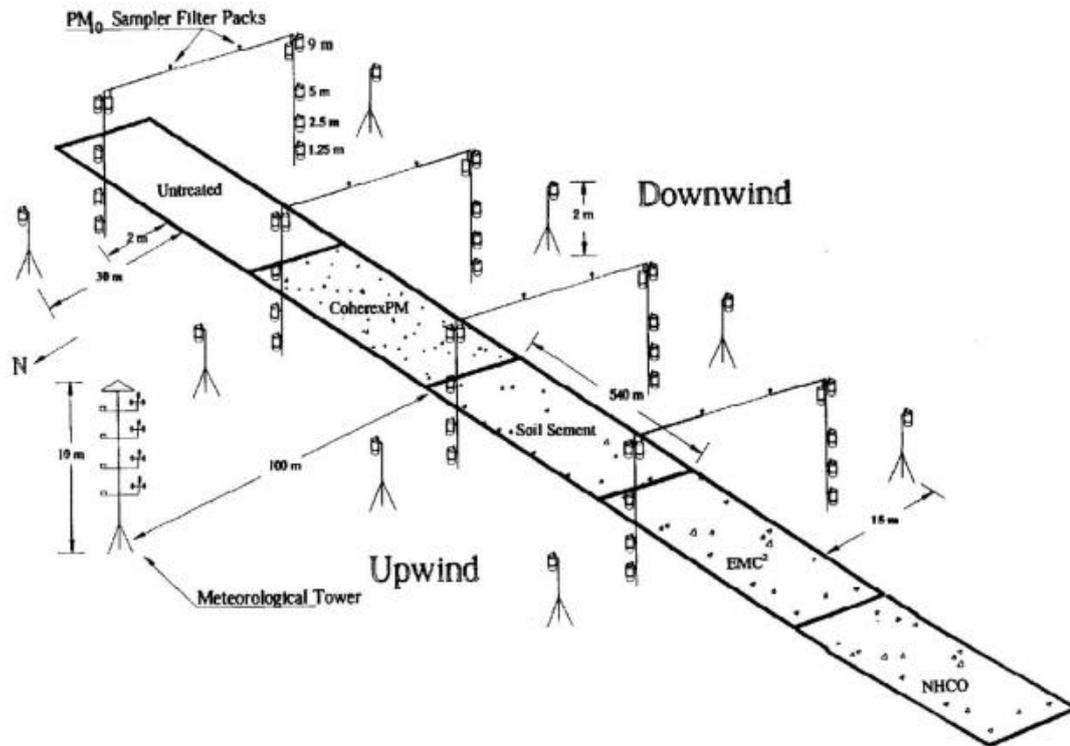
Fonte: Addo e Sanders (2000).

A coleta da poeiras passa a ser realizada quando o gerador é iniciado, e a bomba de sucção passa a aspirar a poeiras para dentro da caixa de metal com o papel filtro, enquanto o veículo se desloca à uma determinada velocidade, permitindo assim que a poeiras seja coletada considerando o trecho de estrada à ser avaliado. Por fim as amostras coletadas são pesadas em laboratório (ADDO; SANDERS, 2000).

Tanto o TRAKER como o *dustometer* são dispositivos móveis para mensuração de poeiras, ou seja, são capazes de mensurar a poeiras de um determinado trecho de estrada enquanto o veículo ao qual estão acoplados está em movimento. Entretanto, além dos dispositivos móveis para quantificação de poeiras, também podemos citar os métodos estáticos, dentre eles se destaca a metodologia proposta por Gillies et al. (1999), que consiste na instalação de torres nas quais são anexados amostradores de poeiras.

Os amostradores de poeiras são fixados nas torres posicionadas ao lado dos trechos experimentais, sendo quatro amostradores nas alturas de 1,25 m, 2,5 m, 5 m e 9 m acima do nível do solo (Figura 5). Na metodologia proposta por Gillies et al. (1999) e também no trabalho de Alzulbaid (1999), existem ainda outros dois amostradores posicionados em cada lado da via a uma distância de cerca de 15 metros, visando estimar a atenuação da emissão de poeiras com a distância. Em conjunto com as estruturas, uma torre meteorológica também foi instalada para monitoramento das condições meteorológicas no momento das medições.

Figura 5. Equipamentos para medição de poeiras segundo metodologia proposta por Gillies et. al (1999).



Fonte: Gillies et al. (1999)

Os métodos descritos acima são os mais utilizados nos trabalhos analisados, fica evidente que em todos os métodos é necessário que os pesquisadores dispendam tempo em construir os aparatos para que seja possível a mensuração, tanto em dispositivos móveis quanto nos estáticos. Nos trabalhos avaliados não foi encontrada comparação entre esses principais métodos utilizados, o que cada autor cita é que tanto o *dustometer* (ADDO; SANDERS, 2000) quanto o *TRAKER* (ETYEMEZIAN, 2003) e ainda as torres propostas por Gillies et al. (1999) é de que seus equipamentos são adequados para medição de poeiras, embora os mesmos não sejam comparados com outros métodos.

Apesar de mais de quase 40% dos trabalhos analisados serem voltados para o tema de caracterização das partículas e da mensuração de poeiras, não existem comparações entre métodos de mensuração de poeiras, os trabalhos apesar de apresentarem as estruturas também não descrevem de maneira detalhada como seria como sua montagem detalhadamente, de forma que possibilite a outros trabalhos experimentais replicar de forma fácil esses mensuradores.

Os dispositivos digitais para mensuração de poeiras fugitivas também possuem um alto valor, é o exemplo dos dispositivos usados no equipamento proposto por (ETYEMEZIAN, 2003). Em orçamento realizado com empresa especializada foi encontrado que em agosto de

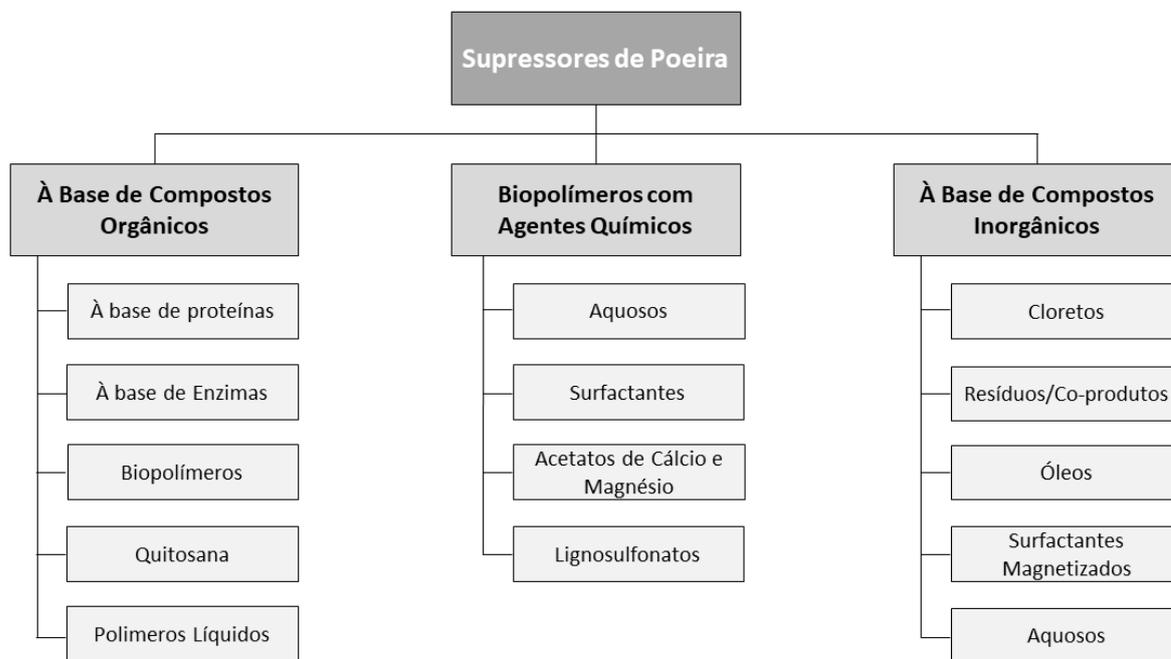
2020 um dispositivo similar ao *DustTrack* custava R\$75.000,00, valor que inviabiliza a execução de muitos projetos. Já o *dustometer* como não utiliza dispositivos digitais para a mensuração (a poeira é coletada apenas no papel filtro) pode se mostrar como uma alternativa mais viável para a utilização, entretanto não há estudos comparando a precisão desses métodos.

2.3.4. Métodos utilizados na supressão de poeiras

Existem dois mecanismos por meio dos quais pode ser realizado o controle de emissão de poeiras, e a eficiência dos supressores é baseada em um ou ambos os mecanismos. Eles são a higroscopicidade e a aglomeração. A higroscopicidade refere-se à capacidade de uma substância sólida de absorver ou adsorver umidade da atmosfera circundante, desta forma, devido à sua afinidade com a água, as substâncias higroscópicas podem reter a umidade e manter a superfície da estrada úmida, o que subsequentemente evita a dispersão da poeira fugitiva. Já a supressão realizada com base no mecanismo de aglomeração, é baseada na inclusão de agentes que promovam a ligação e cimentação nas partículas de poeira. Os agentes aglomerantes induzem forças adesivas entre as partículas de poeira de forma que a massa de partículas aglomeradas aumenta, e assim ficam menos propensas a se espalharem no ar (PARVEJ et al., 2021).

Os supressores podem ser classificados de acordo com suas composições, sendo a base de compostos orgânicos, inorgânicos ou biopolímeros com agentes químicos (Figura 6). Os supressores à base de compostos orgânicos, provêm da extração de compostos de plantas, bactérias, fungos, entre outros, sendo portanto, biodegradáveis. Dentre alguns exemplos que são comumente empregados na prática estão lignossulfonato, quitosana, goma guar, goma xantana e amido de milho. Já os supressores de poeira inorgânicos que são derivados de compostos inorgânicos, quase 75–80% dos materiais de controle de poeira são derivados dessas fontes, sendo a classe que abrange uma ampla gama de materiais, incluindo sais de cloreto, silicatos e surfactantes (PARVEJ et al., 2021).

Figura 6. Classificação dos supressores de poeiras segundo Parvej et al (2021).



Fonte: adaptado de Parvej et al. (2021).

A utilização de cloreto de cálcio e cloreto de magnésio como supressores de poeiras é uma das mais significativas em relação aos experimentos realizados. Vários trabalhos têm como resultado a menor emissão de poeiras em estradas não pavimentadas a partir da aplicação destes supressores (EHSAN, 2002; MONLUX, 2003; SAHA; SANDERS; QUAYENORTEY; JORGENSEN, 2015; EPPS; KSAIBATI, 2020). No estudo de Saha e Ksaibati (2020) a emissão de poeiras teve uma redução de cerca de 87% e o cloreto de cálcio apresentou melhor eficiência comparado ao cloreto de magnésio.

Já no que diz respeito aos supressores que tem sua composição baseada em enzimas, os quais correspondem a testes realizados a partir de 2013, portanto mais recentes, como o supressor testado por Gilmour (2013) sendo um supressor a base de enzimas que tem aglomeração como mecanismo de supressão, como resultados o supressor apresentou uma redução de 0,3 mg/m³ de poeiras fugitivas. Entretanto, esse supressor traz uma necessidade de aplicação frequente, além de ser responsável por um alto custo de manutenção nas estradas não pavimentadas.

Alguns polímeros também são amplamente testados, entretanto como muitas vezes se tratam de produtos comerciais, não se tem acesso aos componentes que fazem parte de sua formulação. No trabalho de Rushing, *et. al* (2006), vários supressores foram testados e principalmente os polímeros apresentaram desempenho excelente no controle de emissão de poeiras, além de que os autores reforçam que os principais mecanismos de controle observados foram a ligação física entre os grãos do solo, fluidos que promovem a aglomeração de partículas e densificação da matriz do solo e materiais que são higroscópicos e reduzem a poeiras ao absorver a umidade das condições ambientais, o que diminui a taxa de secagem da superfície.

No trabalho de Huang et al. (2020), os autores buscaram desenvolver um supressor de alta eficiência e que não trouxesse preocupações ambientais mediante a sua utilização. Como resultado obtiveram uma taxa de redução de cerca de 96% de emissão de PM10 e 64% de PM2,5, em uma formulação composta por carbonato de sódio, poliacrilato de sódio, polietilenoglicol e alquil glicosídeo, combinando, portanto, no mesmo supressor os mecanismos de aglutinação de partículas de solo e de higroscopicidade, visando manter a superfície úmida por maior tempo, evitando a dispersão de partículas de poeiras.

Partindo para a categoria de coprodutos e resíduos industriais, Addo e Sanders (1994), realizaram já na década de 1990 experimentos comparando a eficiência entre aplicação de cloreto de cálcio e lignosulfonato que é um dos resíduos oriundos do processo de obtenção de celulose, como supressores de poeiras em estradas não pavimentadas. Ambos resultaram em menores emissões de poeiras após sua aplicação, o que corroborou para uma estimativa de redução de custos com controle de poeiras de 28 a 42% para a situação analisada.

No trabalho de Dixon-Hardy et al. (2008) foram testados alguns resíduos provenientes de refinaria de petróleo, no qual se chegou a um resultado de 1,5 mg/m³ de redução na emissão de poeiras fugitivas, o autor ainda traz como pontos positivos da utilização desses resíduos o seu baixo custo e oportunidade de conduzir esses a um fim mais nobre, evitando que sejam somente descartados.

Outra opção de coprodutos de processos industriais que já foi testada no trabalho de Dang e Shan (2017) são o colágeno e os coprodutos do processo de fabricação de couro. O foco do trabalho foi voltado para testes utilizando coprodutos oriundos da etapa de degradação do colágeno. Os resultados mostram que a utilização desse coproduto como supressor de poeira pode ser responsável por uma redução de até 68,2% de partículas mais finas (PM2,5) e até 78,7 % de partículas maiores de poeiras fugitivas (PM10).

No trabalho de Yan e Hoekman (2012) os autores apresentam uma revisão do potencial uso da glicerina bruta como um provável supressor de poeira, que se trata de um resíduo proveniente do processo de obtenção de biodiesel, segundo os autores existem muitos relatos e patentes indicando que a glicerina pode ser eficaz no controle de poeiras fugitivas, e ressaltam também que protocolos detalhados da aplicação e utilização desse resíduos são inexistentes. Os autores comentam ainda que padrões e métricas de desempenho não estão disponíveis para avaliar a eficácia do comportamento da glicerina como supressor de poeira. É apontado ainda como ponto positivo o uso em função de ser economicamente atraente devido à alta oferta desse resíduo. Entretanto como se trata somente de uma revisão, não foram realizados experimentos testando esse resíduo como supressor de poeira.

Além dos coprodutos e resíduos testados, existe uma infinidade de opções disponíveis para teste, como no caso de alguns dos coprodutos testados no capítulo II desse trabalho, que tratam principalmente de coprodutos oriundos do processo Kraft em algumas de suas etapas, além de outras opções de resíduos e coprodutos oriundos de outros processos industriais, que entretanto apesar de apresentarem potencial para teste, ainda não existem trabalhos em que tenham sido utilizados em experimentos voltados para o controle de poeira, dentre eles podemos citar como exemplo.

- **Areia de Leito Fluidizado ou Areia de Caldeira:** Trata-se um material que lembra uma areia contaminada de fuligem que é utilizada pela tecnologia de combustão em leito fluidizado. Sua aparência é bastante seca e acinzentada. Em realidade, esse tipo de material não é uma areia, mas um material com características refratárias e de altíssima resistência à temperatura, para não sofrer vitrificação. A densidade e a granulometria são muito uniformes no material em uso, devendo o mesmo ser isento de partículas finas. Isso confere a ele a característica de favorecer a ação de fluidização nas caldeiras com essa tecnologia. Após cumprir seu papel na área de geração de energia, esse resíduo pode ter inúmeras utilidades como agregado na construção civil (argamassas, blocos de concreto, etc.), levando ainda em conta que tem características refratárias. A granulometria do resíduo é bastante estável, sendo que 90% do material têm dimensões entre 0,15 a 1,2 mm. A perda de peso a 500°C é de apenas 0,5%, mostrando que o material é bem estável após ter passado por tantos esforços no desempenho de suas funções de fluidização (FOELKEL, 2011).

- **Grits:** O “grits” é um coproduto formado na preparação da cal hidratada, quando se forma o leite de cal. Esse nada mais é que o resultado da hidratação da cal virgem (óxido de cálcio), formando-se uma solução de cal hidratada ou cal extinta (hidróxido de cálcio). Como

a cal virgem produzida no forno de cal não é absolutamente pura e tampouco é totalmente reativa, sobram resíduos de outros compostos vitrificados, areia, carbonato de cálcio não reativo, etc. Esses resíduos que não se dissolvem são removidos como o “grits”. É comum a presença de carbonato de cálcio no “grits”, pois a calcinação da lama de cal nunca é completa no forno de cal. Também no “grits” se agregam impurezas da cal ou do carbonato de cálcio comprados para “make-up” de cálcio no ciclo do cálcio. Para reduzir a quantidade de “grits” e melhorar a qualidade da cal virgem do forno e a filtrabilidade da lama de cal. O “grits” é rico em cálcio, magnésio, potássio, sódio e alumínio (FOELKEL, 2011).

- **Lama de Cal:** Sua geração ocorre nos momentos em que o forno de cal apresenta algum tipo de problema de manutenção ou operação (redução de carga ou parada). Como as fábricas não possuem por procedimento parar a produção por causa do forno, elas passam a fazer a caustificação do licor verde a partir de cal virgem comprada no mercado até que a solução do problema de manutenção do forno de cal seja resolvido. Com isso, o ciclo de recuperação fica interrompido nesse ponto. Há entrada de cal virgem comprada, mas ocorre ao mesmo tempo uma sobra de lama de cal, já que o forno não tem condições de queimá-la e calciná-la. Quanto mais tempo o forno se mantiver parado e por mais tempo a situação persistir, maior será a geração do resíduo. As quantidades geradas dependem da idade e estado do forno de cal e do sistema de lavagem e desaguamento da lama. A lama de cal é um resíduo bastante interessante, pois é seguro, pode ocorrer na forma bem seca e tem baixas quantidades de elementos considerados perigosos, como metais pesados e dioxinas e furanos (FOELKEL, 2011).

- **Cal:** Sua geração é eventual nas fábricas de celulose. Ela só ocorre em situações de problemas do forno de cal, quando o forno por exemplo tem suas incrustações internas removidas. Existem ainda situações nas quais a cal fica com sua qualidade muito ruim (vitrificação, baixa reatividade, etc.) e os operadores decidem por purgar uma parte dela para melhorar o processo com a adição de cal virgem comprada de boa qualidade. O ideal seria se ter esse material classificado como um subproduto vendável e legalizado para emissão de notas fiscais de produtos e não de resíduos (FOELKEL, 2011).

- **Poliacrilato de sódio:** Um resíduo com alto potencial para uso como supressor de poeira, que inclusive fez parte como um dos componentes da formula sugerida e testada por Huang et al. (2020) é o poliacrilato de sódio, ele pode ser encontrado como resíduo da indústria de produção de fraudas por se tratar de um polímero super absorvente e possuir uma alta capacidade higroscópica. Além de ser classificado como resíduo o poliacrilato de sódio também

pode ser adquirido em lojas especializadas na sua forma pura REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA - SBQ, 2002).

De maneira geral, a grande maioria dos estudos traz experimentos utilizando cloretos de cálcio e magnésio como supressores mais amplamente utilizados, sendo muito menor a quantidade de trabalhos que avalia outros tipos de supressores. Apesar da recente preocupação em desenvolver fórmulas de supressores de alta eficiência como no trabalho Huang et al. (2020), ainda existe muito a ser explorado a respeito do tema, principalmente no que diz respeito ao desenvolvimento de supressores eficientes, que não apresentem riscos ambientais na sua utilização e que também sejam economicamente viáveis.

2.4. CONCLUSÕES

Apesar de ser um tema com um acréscimo no número de publicações nas últimas décadas, ainda existem poucos trabalhos sobre o controle de poeiras em estradas não pavimentadas. Existem muitos assuntos a serem melhor explorados dentro do tema como a comparação de metodologias para a mensuração de poeiras e desenvolvimento de metodologias mais economicamente viáveis, comparação entre supressores comerciais e também testes com coprodutos e outros componentes químicos que apresentem potencial.

No Brasil o número de trabalhos relacionados ao assunto é quase zero, essa ausência de estudos que busquem tratativas para o problema da emissão de poeiras evidencia a necessidade da realização de pesquisas nesse tema, visto que o Brasil possui um número bem maior de rodovias não pavimentadas.

A comparação entre formas de supressão de poeiras, principalmente no que diz respeito aos estabilizantes químicos precisa ser estudada e testada em diversas condições, uma vez que a eficiência de cada produto pode variar muito em função do tipo de solo, condições climáticas, tipo e velocidade de veículos que transitam pela via, além de outros fatores.

Dessa forma, o controle de poeiras em estradas não pavimentadas é um tema com muitas possibilidades para realização de pesquisas e experimentos, principalmente no Brasil, uma vez que a emissão de poeiras fugitivas pode representar um dos principais problemas para o tráfego nessas vias, trazendo riscos à saúde, aumento do risco de acidentes e ainda contribuindo para a deterioração da via.

3. CAPÍTULO II – COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS E EFEITO DE COPRODUTOS INDUSTRIAIS DA FABRICAÇÃO DE PAPEL E CELULOSE COMO ALTERNATIVA DE ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

RESUMO

Diante das adversidades causadas pelo excesso de poeiras fugitivas nas estradas não pavimentadas, surge a necessidade de controle e supressão dessas poeiras, buscando a atenuação dos problemas decorrentes da mesma. Assim, uma das formas mais efetivas de realizar esse controle se dá por meio da estabilização química e mecânica dos solos dessas vias. O objetivo deste capítulo é avaliar o comportamento de algumas misturas de solo associadas a coprodutos industriais e outros componentes utilizados no controle e supressão de poeiras, por meio da avaliação das características mecânicas do solo. Foram definidas duas áreas experimentais na qual cada uma teve cinco trechos experimentais delimitados, em cada trecho foram coletadas amostras de solo nas laterais e centro das vias. Os solos foram caracterizados pelas análises de granulometria por sedimentação e peneiramento, análise de consistência e compactação por proctor na energia normal. Para a comparação foram definidos seis tratamentos contendo coprodutos do processo Kraft, sendo eles **T1:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal; **T2:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal; **T3:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits; **T4:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana; **T5:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana; **T6:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana. Para comparação entre os tratamentos foi realizada análise de granulometria por sedimentação, análise de consistência e compactação por proctor na energia normal. Os tratamentos T1, T2 e T3 apresentaram redução no índice de plasticidade em ambos os tipos de solos dos dois grupos da área experimental de Lages variando de 8,1% a 5,4% no G3LG e 3,03% a 0,13% no grupo G4LG, aumento de até 0,08 g.cm⁻³ na massa específica aparente seca máxima dos solos do grupo G3LG. Os demais tratamentos (T4, T5 e T6) causaram aumento nos índices de plasticidade de até 39% no G4LG e 20% no G3LG e diminuindo a massa específica aparente seca máxima de compactação em até 0,2 g.cm⁻³ no G4LG. De maneira geral os tratamentos de 1 a 3 diminuíram os índices de plasticidade e aumentaram a massa específica aparente seca máxima de compactação se mostrando alternativas mais interessantes para utilização na estabilização de solos em relação aos tratamentos de 4 a 6.

Palavras-chave: coprodutos industriais, controle de poeiras, mecânica do solo.

3.1. INTRODUÇÃO

No setor florestal, tanto o transporte dos insumos que viabilizam a própria produção florestal, quanto o transporte da madeira proveniente dos reflorestamentos até as fábricas, são predominantemente realizados pelo sistema rodoviário (CORRÊA, 2005).

O planejamento adequado da rede viária de uma empresa florestal é de grande importância, de forma que, as estradas florestais representam, depois da floresta, o principal investimento num empreendimento florestal além de apresentar longo período de depreciação, sendo composto por diferentes custos em função do padrão escolhido (MALINOVSKI et al., 2004).

Um dos principais parâmetros técnicos de uma rede viária florestal é o tipo de solo, no que se refere a sua disponibilidade e capacidade de suporte, entretanto, em muitas situações o solo presente no local da via não apresenta condições adequadas, podendo apresentar baixa resistência por exemplo. Assim, as boas condições de trafegabilidade de uma estrada rural ou florestal precisam ser garantidas evitando gastos desnecessários com manutenções excessivas devido problemas que afetam as estradas e estejam relacionados a falta de planejamento. (TRINDADE et al. 2008).

Um dos principais problemas que pode estar presente nas estradas não pavimentadas é a emissão de poeiras fugitivas, a qual é gerada a partir do atrito entre as rodas e/ou implementos dos veículos que trafegam pela via e também por meio da erosão eólica, ambos mecanismos de geração de poeiras são intensificados em condições de seca (EPA, 1995).

Essas emissões podem ter implicações significativas na atmosfera e em ecossistemas terrestres e marinhos. Como principais problemas causados pela emissão de poeiras fugitivas estão a poluição atmosférica e os danos à saúde humana, podendo causar principalmente problemas respiratórios (KATRA, 2019). Visando solucionar problemas como o controle de poeiras fugitivas, e melhoria das condições de trafegabilidade das estradas, surgem alternativas como a estabilização química e/ou mecânica dos solos dessas vias (PARVEJ et al., 2021).

Os estabilizantes podem ser classificados em estabilizantes comerciais tradicionais, e em não tradicionais, em que no caso do segundo podem ser considerados os resíduos de diversos processos industriais (TINGLE, 2007). Os resíduos industriais têm o potencial para utilização no processo de estabilização química do solo, sendo uma alternativa ambientalmente adequada, pois, muitas vezes, mesmos os resíduos não poluentes, são descartados em aterros decorrendo em passivos ambientais (VARGAS, 2019).

Desta forma, a utilização de resíduos industriais na estabilização de solos, evitando o seu descarte em aterros e trazendo-os à uma finalidade mais nobre pode ser considerada visando a melhoria nas condições de trafegabilidade das estradas não pavimentadas, atenuando problemas como o excesso de poeiras fugitivas por exemplo, ficando evidenciada a necessidade do desenvolvimento de pesquisas visando avaliar o potencial de utilização desses resíduos na estabilização de solos de estradas não pavimentadas.

Assim, o objetivo deste capítulo é avaliar o comportamento de algumas misturas de solo associadas a coprodutos industriais e outros componentes utilizados no controle e supressão de poeiras, por meio da avaliação das características mecânicas do solo

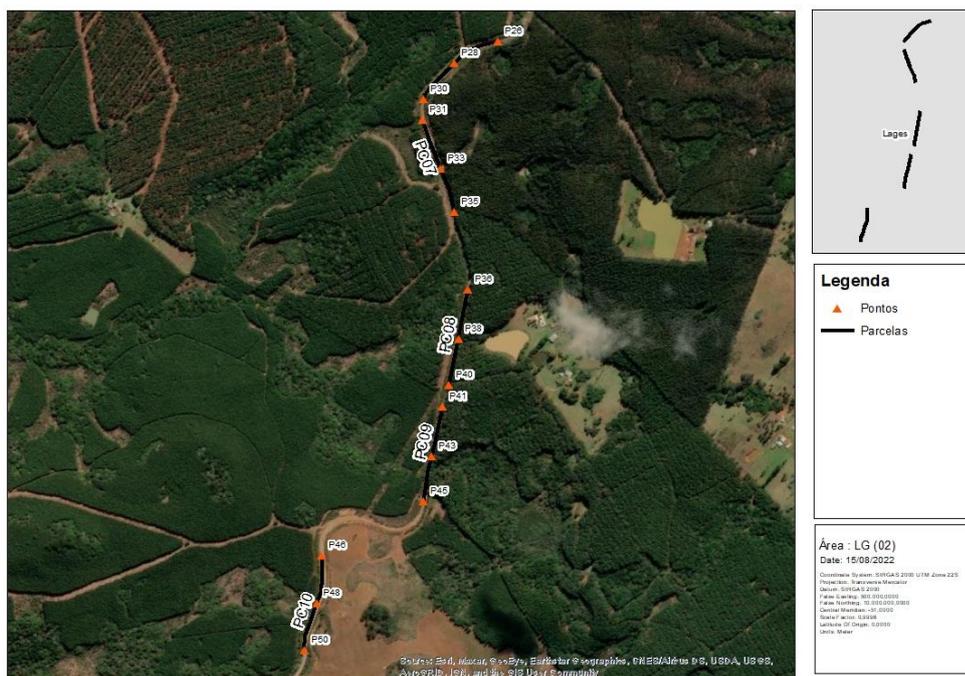
3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Caracterização das áreas de estudo

Foram escolhidas duas áreas experimentais com base nos tipos de solos e condições mais representativas das situações operacionais da empresa parceira desta pesquisa. Em cada área de estudo, os trechos de estrada foram selecionados tendo em vista a viabilidade técnica de execução de experimentos *in situ* no futuro, esses foram determinados com 250 metros de comprimento, e para tal determinação foi considerada a metodologia proposta por Thenoux, Bellolio e Halles (2007), que determina que trechos para testes de controle e supressão de poeiras precisam ter no mínimo 250 metros de comprimento. Os trechos em questão estão localizados nos município de Lages e Correia Pinto, no estado de Santa Catarina (Figuras 7 e 8).

Em ambas as áreas de estudo o solo é classificado como Cambissolo Húmico Distrófico de acordo com o mapeamento de solos realizado pela EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) (AGLIO et al., 2011). O tipo climático da região que abrange as duas áreas experimentais segundo a classificação de Koeppen é especificado como Cfb – Temperado (mesotérmico úmido e verão ameno), a temperatura média anual é de 15 a 16 °C e a precipitação média anual é de 1.300 a 1.500 mm (ICEPA, 2003).

Figura 7. Croqui de localização dos pontos e parcelas experimentais localizadas no município de Lages/SC.



Fonte: a autora (2022)

Figura 8. Croqui de localização dos pontos e parcelas experimentais localizadas no município de Correia Pinto – SC.



Fonte: a autora (2022)

Após escolha das áreas, foi realizada sondagem e caracterização dos solos presentes nos trechos experimentais por meio da coleta e análise solo de três pontos de cinco parcelas, totalizando 15 pontos em cada área, os solos de cada ponto foram homogeneizados considerando as coletas realizadas nos trilhos de roda e no centro da via em cada ponto.

Foram realizadas coletas de solo em ambas áreas de estudo, de forma que os solos foram coletados a uma profundidade de até 30 cm nos trilhos de roda e no centro das vias. A coleta foi realizada de forma manual com o auxílio de picaretas e pás, sendo coletados aproximadamente 50 kg de cada ponto, sendo armazenados em sacos plásticos com as respectivas identificações.

Após a coleta, os solos foram transportados para o Laboratório de Operações e Estradas Florestais (LOPEF/CAV) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), onde permaneceram secando ao ar por alguns dias, e em seguida foram moídos e peneirados de acordo com a necessidade de quantidade para as amostras de cada análise.

O estudo foi dividido em duas etapas: (i) caracterização dos tipos de solo presentes nas áreas de estudo; (ii) testes experimentais em laboratório para comparação dos tratamentos.

3.2.2. Etapas de estudo

Na etapa 1, para realização da caracterização e agrupamento dos solos, foram realizados os ensaios laboratoriais de granulometria por sedimentação e peneiramento, análises de limites de consistência, compactação na energia normal.

Na etapa 2, seguiu-se com a realização dos ensaios para comparação de tratamentos advindos de misturas de solos mais coprodutos industriais do processo de polpação *Kraft* e outros componentes com potencial de controle e supressão de poeiras. Nesta etapa, foram considerados somente os solos das área experimental localizada no município de Lages. Tal área foi priorizada por sugestão dos técnicos responsáveis pela equipe de estradas da empresa parceira na pesquisa.

Os tratamentos foram definidos em função dos coprodutos disponibilizados pela empresa parceira, a qual indicou a necessidade de testar, principalmente, a areia de leiteo fluidizado como material constituinte para a construção de estradas, uma vez que este possui uma grande quantidade gerada pela indústria no processo *Kraft*, de forma que seria ideal verificar a possibilidade de um destino para esse material em vez de destiná-lo a algum aterro.

Desta forma, foram disponibilizados pela empresa a areia de leiteo fluidizado, a cal, a lama de cal e o *grits*, coprodutos oriundos do processo *Kraft*. Os tratamentos determinados estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos considerados para teste.

Tratamento	Descrição
T1	Solo Local + 15% Areia de Leiteo Fluidizado + 5% Cal
T2	Solo Local + 15% Areia de Leiteo Fluidizado + 5% Lama de Cal
T3	Solo Local + 15% Areia de Leiteo Fluidizado + 5% Grits
T4	Solo Local + 15% Areia de Leiteo Fluidizado + 5% Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana
T5	Solo Local + 15% Areia de Leiteo Fluidizado + 5% Lama de Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana
T6	Solo Local + 15% Areia de Leiteo Fluidizado + 5% Grits + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana

Fonte: a autora (2022)

Os tratamentos T1, T2 e T3 se referem as misturas de areia de leiteo fluidizado na porcentagem de 15%, adicionadas de 5% de cada um dos outros coprodutos disponibilizados juntamente com o solo local da área experimental de Lages. Nos tratamentos T4, T5 e T6 as misturas utilizadas nos tratamentos T1, T2 e T3 foram associadas ainda a alguns componentes já testados em supressores de poeiras sendo 0,5% de poliacrilato de sódio, produto constituinte do supressor desenvolvido por Huang et al. (2020) em seu trabalho, e 1% de goma xantana, componente testado no trabalho de Wei et al. (2021), também como constituinte de um produto

para supressão de poeiras. Não existem estudos em que tenha sido testada a utilização da área de leito fluidizado para estabilização de solos, desta forma foi fixada a porcentagem de 15% nesse estudo inicial, uma vez que o objetivo é testar a areia de leito fluidizado associada aos demais coprodutos.

Da mesma forma que os solos, os coprodutos que foram fornecidos pela empresa foram transportados até o Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV) da UDESC, onde foram secos ao ar e peneirados de acordo com as exigências de cada norma utilizada para as respectivas análises, para posteriormente serem misturados aos solos, compondo os tratamentos. Os demais componentes (goma xantana e poliacrilato de sódio) foram adquiridos em lojas especializadas. Nessa etapa de comparação dos tratamentos foi realizada análise de granulometria por sedimentação, análise dos limites de consistência dos solos e análise de compactação na energia normal.

3.2.3. Ensaios laboratoriais

3.2.3.1. Granulometria por sedimentação

Nas etapas 1 e 2 do trabalho, a análise granulométrica por sedimentação foi realizada conforme a norma DNER-ME 051/94 (DNER, 1994a). Foram realizadas três repetições por ponto de coleta de solo, sendo três pontos por trecho experimental, totalizando 45 repetições por área de estudo, visando a caracterização dos respectivos solos. Já na etapa 2 foram realizadas três repetições por tratamento, somente os tratamentos T1, T2 e T3 foram contemplados nesse ensaio, uma vez que os demais apresentaram alta viscosidade no momento da realização da análise o que pode ter acontecido pela presença do poliacrilato de sódio devido a sua alta capacidade higroscópica e também a presença de goma xantana que por ser um aglutinante pode ter causado aumento na viscosidade, o que poderia resultar em valores não condizentes com a realidade.

3.2.3.2. Agrupamento de solos com características similares

Após a realização das análises de granulometria por sedimentação, os solos de cada trecho foram agrupados em quatro grupos, sendo dois grupos referentes aos solos dos trechos experimentais localizados no município de Correia Pinto e outros dois grupos referentes aos trechos experimentais localizados no município de Lages.

Os solos foram previamente agrupados de acordo com as suas porcentagens de areia silte e argila por área de estudo, dessa forma os solos com valores próximos próximos (variações

menores que 10% para areia e menores que 5% para argila) foram agrupados.

3.2.3.3. Granulometria por peneiramento

A análise granulométrica para caracterização dos solos puros, foi realizada conforme a metodologia proposta pelo DNER – ME 051 (DNER, 1994a), sendo a frações sólidas grossas a partir da areia fina (diâmetro acima de 0,05 mm). Foram consideradas três repetições de 1 kg cada para a separação por peneiramento.

A análise de granulometria por peneiramento foi realizada na etapa 1 do trabalho tendo como intuito de caracterização dos solos uma vez que é necessária para a classificação dos mesmos, já na etapa 2 para a comparação entre os tratamentos utilizados, ou seja utilizando-se os solos associados as misturas a análise de granulometria por peneiramento não foi realizada.

3.2.3.4. Índice de curvatura e índice de uniformidade

Com os resultados da análise granulométrica por sedimentação e por peneiramento, foi possível plotar a curva granulométrica de cada grupo de solo podendo, então, serem determinados o coeficiente de Curvatura (Cc) e o coeficiente de uniformidade (Cnu), conforme as Equações 1 e 2.

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}} \quad \text{Equação 1}$$

$$Cnu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: D10 = Ponto em que 10% das partículas possuem diâmetro inferiores a ele; D30 = Ponto em que 30% das partículas possuem diâmetro inferiores a ele; D60 = Ponto em que 60% das partículas possuem diâmetro inferiores a ele.

Para o Cc, que trata da graduação das curvas, aquelas que apresentam valores inferiores a 1 são as “mediamente graduadas”, as com valores entre 1 e 3 são “bem graduadas” e superiores a 3 são as “mal graduadas” (PINTO, 2006).

3.2.3.5. Limites de consistência

Para determinação dos limites de consistência dos solos puros e também das misturas, procedeu-se com o ensaio de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) conforme o ensaio proposto pelo DNER - ME 122 e 82, respectivamente (DNER, 1994 b, c). Os limites de liquidez foram obtidos por meio da estimativa realizada pela equação definida pela regressão linear considerando ao menos cinco pontos de cada amostra, tendo como critério coeficiente de

determinação (R^2) de no mínimo 0,8.

O LP foi realizado em laboratório com a mesma porção de solo que passa na peneira de Nº 40 para o LL, após adição de água destilada e homogeneização. Com essa massa de solo, foi moldado um cilindro de 3 mm de diâmetro com o auxílio das mãos e de uma placa de vidro esmerilhada. Para determinar a umidade deste ponto, utiliza-se uma estufa a 105 – 110°C, foram consideradas três repetições. O índice de plasticidade (IP) foi calculado pela diferença entre os valores de LL e o LP.

3.2.3.6. Compactação do solo

Os parâmetros da curva de compactação, massa específica aparente seca máxima do solo (D.Max) e a umidade ótima de compactação (U.Ot) do solo puro e das misturas foram obtivos por meio do Ensaio de Proctor em Energia Normal realizado de acordo com o método DNER-ME 129 (DNER, 1994c). A curva de compactação foi determinada compactando-se o solo em três camadas com cinco ou seis umidades, tentando-se conseguir intervalos de 2,5 % de umidade entre os pontos, sendo realizadas no mínimo 5 pontos por curva de compactação e tendo como critério coeficiente de determinação da curva (R^2) de no mínimo 0,8.

3.2.3.7. Classificação dos solos

Os solos de cada um dos trechos experimentais de ambas áreas de estudo foram classificados ainda quanto a classificação TRB (*Transportation Research Board*) e, também, quanto ao SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos).

3.2.4. Análise dos dados

Todos os dados foram submetidos a estatísticas descritivas e analisados por delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC). Os dados *outliers* foram eliminados, avaliando-se o ajuste das equações para estimativa da umidade ótima, massa específica aparente seca máxima de compactação e limite de liquidez por meio do coeficiente de determinação (R^2). Para o agrupamento de solos as variáveis porcentagens de areia, silte e argila obtidas por meio da análise de granulometria por sedimentação foram submetidas ao teste de normalidade por Kolmogorov-Smirnov, sendo que todas tiveram a normalidade atendida. Os dados foram ainda submetidos ao teste de comparação de médias de Tukey a 5% de significância.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Caracterização dos solos

Como resultado da análise de granulometria por sedimentação na etapa 1 do trabalho, utilizando-se somente os solos puros foi possível determinar os valores de porcentagens de areia, silte e argila para cada ponto onde foi realizada a de coleta de solo em cada uma das áreas de estudo (Tabela 2). A partir desses resultados tem-se o agrupamento dos solos, apresentado na Tabela 3.

Tabela 2. Percentual de areia, argila e silte, obtidos por meio de análise de granulometria por sedimentação para ambas áreas de estudo.

Pontos	Grupo	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)
		Porcentagem Média e Desvio Médio		
P01	G1CP	68,76 ($\pm 0,42$) g h	1,28 ($\pm 0,06$) c	29,96 ($\pm 0,49$) a
P05		63,47 ($\pm 0,58$) e f	0,59 ($\pm 0,04$) b	35,94 ($\pm 0,53$) c d e
P06		67,34 ($\pm 1,41$) f g h	0,24 ($\pm 0,01$) a	32,42 ($\pm 1,44$) a b c
P08		70,25 ($\pm 0,72$) h	0,51 ($\pm 0,01$) b	29,24 ($\pm 0,71$) a
P10		66,69 ($\pm 0,13$) f g h	0,17 ($\pm 0,02$) a	33,14 ($\pm 0,16$) a b c
P11		65,27 ($\pm 0,23$) f g	0,20 ($\pm 0,03$) a	34,53 ($\pm 0,18$) b c d
P15		65,22 ($\pm 2,52$) f g	0,27 ($\pm 0,01$) a	34,51 ($\pm 2,51$) b c d
P18	G2CP	60,21 ($\pm 1,26$) d e	2,10 ($\pm 0,09$) f	37,69 ($\pm 1,17$) d e
P20		56,08 ($\pm 0,57$) c	1,36 ($\pm 0,05$) c d	42,56 ($\pm 0,63$) f
P21		60,98 ($\pm 1,27$) e	1,46 ($\pm 0,04$) d e	37,56 ($\pm 1,33$) d e
P23		56,32 ($\pm 0,71$) c d	4,01 ($\pm 0,01$) g	39,67 ($\pm 0,72$) e f
P25		49,8 ($\pm 0,62$) b	1,49 ($\pm 0,04$) d e	48,71 ($\pm 0,68$) g
P28	G3LG	37,89 ($\pm 0,25$) b c	34,41 ($\pm 1,17$) d	27,71 ($\pm 1,36$) d e f g h
P30		26,66 ($\pm 1,16$) a	44,16 ($\pm 1,44$) e	29,18 ($\pm 0,92$) e f g h
P31	G4LG	33,07 ($\pm 0,62$) a b	15,94 ($\pm 0,22$) b	50,99 ($\pm 0,31$) i
P35		43,46 ($\pm 0,06$) c d e	26,06 ($\pm 0,18$) c	30,49 ($\pm 0,31$) f g h
P36		67,56 ($\pm 1,3$) i j	14,14 ($\pm 2,93$) b	18,30 ($\pm 2,85$) b c
P39		46,19 ($\pm 3,81$) d e f	26,68 ($\pm 2,13$) c	27,13 ($\pm 2,6$) d e f g
P40		32,59 ($\pm 0,15$) a b	23,78 ($\pm 1,57$) c	43,64 ($\pm 2,37$) i
P41		61,84 ($\pm 0,05$) h i j	16,76 ($\pm 1,2$) b	21,40 ($\pm 1,64$) b c d e
P43		63,01 ($\pm 4,92$) h i j	11,48 ($\pm 0,87$) b	25,51 ($\pm 5,17$) c d e f
P45		39,71 ($\pm 0,87$) b c d	25,73 ($\pm 0,68$) c	34,56 ($\pm 0,09$) g h
P46		51,98 ($\pm 0,41$) f g	28,13 ($\pm 0,62$) c	19,89 ($\pm 0,36$) b c d
P48		69,10 ($\pm 0,87$) j	15,00 ($\pm 0,58$) b	15,91 ($\pm 0,05$) b
P50	50,01 ($\pm 0,46$) e f g	26,47 ($\pm 0,85$) c	23,52 ($\pm 1,13$) b c d e f	

*Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade Em que: **P** = Ponto; **G1CP** = Grupo 1- Correia Pinto; **G2CP** = Grupo 2 - Correia Pinto; **G3LG** = Grupo 3 - Lages; **G4LG** = Grupo 4 - Lages;

Em todas as variáveis (areia, silte e argila) houve diferenças estatísticas entre os pontos, de forma que considerando as diferenças estatísticas e os valores mais próximos para as

variáveis entre os pontos foi realizado o agrupamento dos solos nos quatro grupos. A partir disso e de posse da média das variáveis para cada grupo e das diferenças significativas estatisticamente entre os grupos (Tabela 3) foi possível confirmar o agrupamento de solos.

Justificando o agrupamento de solos, na Tabela 3 tem-se que para a variável porcentagem de areia apenas o G1CP diferiu estatisticamente, e para a porcentagem de silte nenhum dos grupos apresentou diferenças estatísticas. Já para a variável argila os solos da área experimental localizada em Lages (G3LG e G4LG) apresentaram diferenças significativas entre si e quando comparados com os solos da área experimental de Correia Pinto (G1CP e G2CP) os quais não tiveram diferenças significativas para porcentagem de argila. Dessa forma em função das diferenças estatisticamente significativas entre as variáveis porcentagem de areia e porcentagem de argila, confirmou-se a divisão dos solos nos quatro grupos descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Grupos de solo e suas respectivas porcentagens de areia, silte e argila, obtidos por meio de análise de granulometria por sedimentação.

Siglas	Descrição	Areia	Silte	Argila
		Porcentagem média e desvio padrão		
G1CP	Grupo 1 – Correia Pinto	66,71 ($\pm 2,31$) a*	32,82 ($\pm 2,48$) a	0,47 ($\pm 0,39$) a
G2CP	Grupo 2 – Correia Pinto	56,68 ($\pm 4,44$) b	41,24 ($\pm 4,64$) a	2,08 ($\pm 1,12$) a
G3LG	Grupo 3 – Lages	32,28 ($\pm 7,94$) b	28,45 ($\pm 1,04$) a	39,29 ($\pm 6,89$) b
G4LG	Grupo 4 – Lages	50,77 ($\pm 13,16$) b	28,3 ($\pm 10,95$) a	20,92 ($\pm 6,21$) c

*Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. **Em que:** G1CP = Grupo 1 - Correia Pinto; G2CP = Grupo 2 - Correia Pinto; G3LG = Grupo 3 - Lages; G4LG = Grupo 4 - Lages.

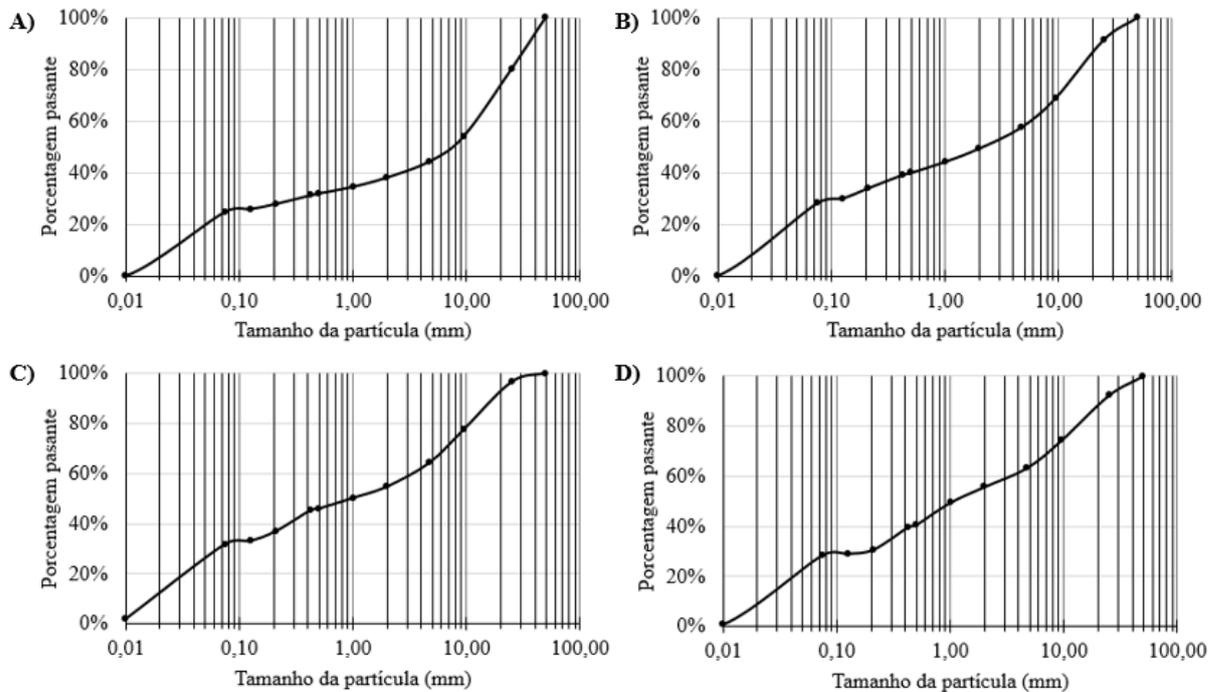
Fonte: a autora (2022)

Os solos da área experimental localizada em Lages se destacam por seu elevado percentual de argila em relação aos solos da área localizada em Correia Pinto. Para os grupos G1CP e G2CP as porcentagens de argila tiveram valores bem próximos, de forma que a separação dos grupos se deu principalmente em função da quantidade de areia e silte, sendo o Grupo 1 (G1CP) portador de uma média de 66,71% de areia, enquanto o Grupo 2 (G2 CP) teve uma média um pouco menor, correspondendo a 56,67%. Para a área experimental de Lages, o Grupo 3 (G3 LG) apresentou um valor mais elevado de porcentagem de argila, com média de 39,28%, enquanto o Grupo 4 (G4 LG) apresentou média de 20,92 %.

Os solos com maiores teores de argila portanto, são os solos dos grupos G3LG e G4 LG, nos quais a estabilização pode surtir efeitos mais significativos, uma vez que segundo Olenik (2016), ligantes como a cal geralmente reagem com os minerais de argila, resultando assim em um solo estabilizado com melhores propriedades geotécnicas.

A partir dos resultados obtidos pela análise de granulometria por peneiramento e sedimentação, foram plotadas as curvas granulométricas apresentadas na Figura 9.

Figura 9. Curvas granulométricas obtidas por meio de análise de granulometria por peneiramento para os solos puros dos grupos: A) G1CP B) G2CP C) G3LG e D) G4LG.



Fonte: a autora (2022)

A partir das curvas granulométricas, adquirindo-se os por meio destas os valores dos coeficiente de curvatura (CC) e coeficiente de uniformidade (CNU) (Tabela 4) chegou-se ao resultado de que as curvas granulométricas para os solos da área experimental de Correia Pinto (G1CP e G2CP) apresentaram valores de inferiores a 1, o que indica que se tratam de curvas medianamente graduadas, já para os grupos da área experimental de Lages (G3LG e G4LG) os valores de CC foram superiores a 3, o que indica que são solos mal graduados. Já para o índice CNU todos os valores foram muito superiores a 15, o que indica que os solos de todos os grupos podem ser considerados como desuniformes.

A diminuição do valor CNU pode significar que o solo está se tornando mais uniforme, em que, que a amplitude de tamanhos de grãos está diminuindo, já a diminuição de CC mostra que as curvas do solo estão se tornando mais bem graduadas, e vice-versa. O CC mede a inclinação da curva, portanto curvas suaves em toda a sua extensão, indicam solos ou materiais bem graduados (PINTO, 2006).

Tabela 4. Coeficiente de Curvatura e Coeficiente de Uniformidade referente as curvas granulométricas de cada grupo de solos.

Coeficientes	Grupos de Solo			
	G1CP	G2CP	G3LG	G4LG
CC	0,76	0,15	5,16	6,23
CNU	303,03	242,42	350,00	325,00

Em que: **CC**: coeficiente de curvatura; **CNU**: coeficiente de uniformidade.

Fonte: a autora (2022)

Com base nos resultados apresentados na Tabela 5, estão as classificações de solo para cada grupo de solos. Os solos dos grupos G1CP e G2CP foram classificados na metodologia SUCS como pedregulhos siltosos, ou misturas de pedregulho areia e silte, dessa forma são todos solos considerados grossos. Na classificação TRB, os solos de todos os trechos foram classificados como A-2-6. Segundo DNIT (2006) os solos do tipo A-2 Englobam os solos com 35% ou menos passando na peneira N° 200 que não podem ser classificados nos Grupos A-1 ou A-3, devido ao teor de finos que contém ou pela plasticidade que apresentam, ou por ambos em excesso dos limites definidos para referidos grupos, já os solos classificados como A1 tem como material típico uma mistura bem graduada de fragmentos de pedra ou pedregulhos, areia grossa, areia fina e um aglutinante de solo não plástico ou fracamente plástico.

Os solos G3LG e G3LG também foram classificados como grossos pela metodologia SUCS, entretanto devido as suas maiores porcentagens de argila as classificações foram de areias argilosas ou areias siltosas. Na classificação TRB os solos da área I foram classificados como A27 e A1B respectivamente.

De maneira geral os solos dos grupos G1CP e G2CP apresentaram maiores porcentagens de areia e portanto, menores índices de plasticidade, em comparação com os solos G3LG e G4LG.

Tabela 5. Classificações de solos pelas metodologias SUCS e TRB para cada grupo de solo.

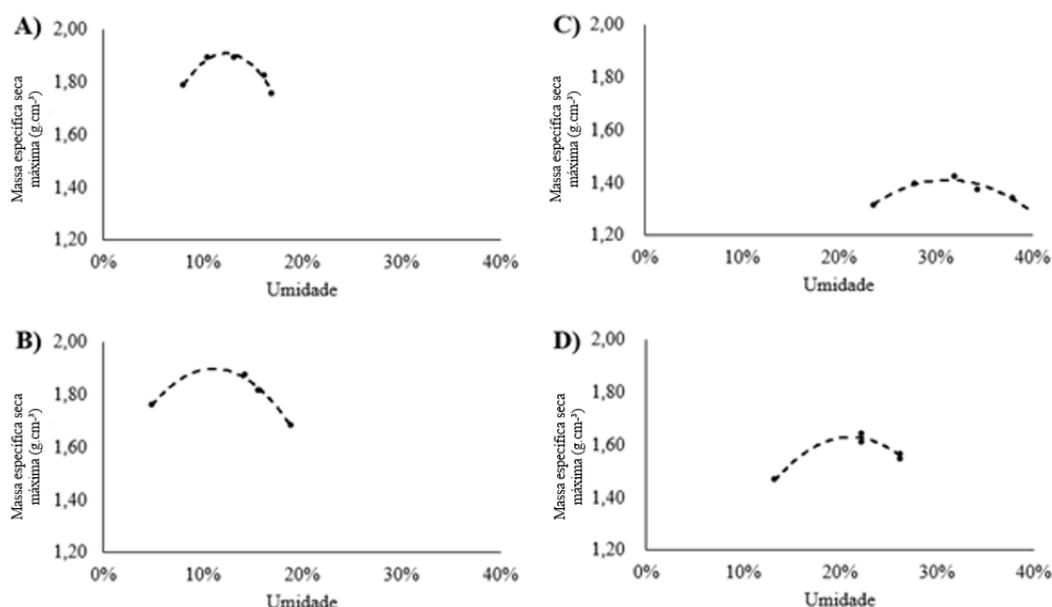
Grupo	Malha das Peneiras				Consistência			Classificações	
	200	40	10	4	LP	LL	IP	SUCS	TRB
	% Passante								
G1CP	22,37	28,93	36,03	42,47	21,63	23,2	1,60	Pedregulhos siltosos, ou misturas de pedregulho areia e silte	A-2-6
G2CP	25,75	37,00	47,50	56,05	23,95	22,25	0,70	Areias Siltosas - Mistura de Areia e Silte	A-2-6
G3LG	28,40	42,60	52,40	62,5	43,5	51,60	8,10	Areias Argilosas - Mistura de Areia e Argila	A-2-7
G4LG	25,50	37,18	54,10	61,93	32,63	35,53	3,13	Areias Siltosas - Mistura de Areia e Silte; Areias Argilosas - Mistura de Areia e Argila	A-1-b

Em que: **LP** = Limite de Plasticidade; **LL** = Limite de Consistência; **IP** = Índice de Plasticidade; **SUCS** = Sistema Unificado de Classificação de Solos; **TRB** = *Transportation Research Board*.

Fonte: a autora (2022)

Na Figura 10 e na Tabela 6 estão os resultados referentes as análises de compactação por Proctor realizadas para o solo puro. Os solos dos grupos G1CP e G2CP apresentaram menores valores de umidade ótima e maiores valores de massa específica aparente seca máxima em relação aos solos dos grupos G3LG e G4LG. Todas as equações para estimativa da umidade ótima e massa específica aparente seca máxima tiveram valores de R² maiores que 0,9.

Figura 10. A) e B) Curvas de Proctor para os solos dos grupos G1CP e G2CP respectivamente; C) e D) Curvas de Proctor para os solos dos grupos G3LG e G4LG respectivamente



Fonte: a autora (2022).

Tabela 6. Umidade Ótima e Massa específica aparente seca máxima estimadas por meio das curvas das análises de Proctor para ambas as áreas de estudo.

Tipo Solo	Umidade Ótima	Massa específica aparente seca máxima (g.cm ⁻³)	Equação	R ²
G1CP	12,3%	1,91	MMáx. = -65,814x ² + 16,253x + 0,9058	0,9658
G2CP	11,1%	1,90	MMáx = -36,089x ² + 8,0195x + 1,4533	0,9898
G3LG	31,2%	1,41	MMáx = -16,059x ² + 10,029x - 0,1556	0,9551
G4LG	21,1%	1,63	MMáx = -27,216x ² + 11,478x + 0,42	0,9643

Em que: G1CP = Grupo 1 - Correia Pinto; G2CP = Grupo 2 - Correia Pinto; G3LG = Grupo 3 - Lages; G4LG = Grupo 4 - Lages; MMáx: Massa específica aparente seca máxima de compactação R²: coeficiente de correlação.

Fonte: a autora (2022).

3.3.2. Comparação entre tratamentos

Como descrito anteriormente, nesta etapa de comparação entre tratamentos, foram considerados somente os solos das área experimental localizada no município de Lages. Tal área foi priorizada por sugestão dos técnicos responsáveis pela equipe de estradas da empresa parceira na pesquisa.

3.3.2.1. Granulometria por sedimentação

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados para análise de granulometria por sedimentação para os tratamentos T1, T2 e T3. Não foi possível obter resultados referentes aos demais tratamentos, uma vez que estes aumentaram muito a viscosidade da amostra, impedindo o andamento de acordo com a metodologia da análise.

Como o aumento da viscosidade das amostras se deu nos tratamentos T4, T5 e T6 e sua principal diferença dos demais consiste na adição de poliacrilato de sódio e goma xantana, possivelmente esses dois componentes sejam responsáveis por esse aumento, uma vez que a goma xantana consiste em um aglutinante e o poliacrilato de sódio é um polímero super absorvente com uma alta capacidade higroscópica.

Do ponto de vista de controle e supressão de poeira, aditivos que tragam maior viscosidade para as amostras são muito importantes. No trabalho de Huang et al. (2020) foi considerado pelos autores que a viscosidade é uma das principais características que precisam ser observadas em um supressor de poeira, uma vez que possui influência direta na capacidade que o supressor terá em manter as partículas de poeira fugitiva unidas.

Na comparação dentre os tratamentos e o solo puro não houve diferenças estatisticamente significativas, o que indica que os diferentes tratamentos utilizando areia de leito fluidizado associada a cal, lama de cal ou ainda grits não surtiram diferenças nas porcentagens de finos dos solos analisados.

Tabela 7. Porcentagem de argila, areia e silte para os diferentes tratamentos.

Solo	Amostra	Areia %	Silte %	Argila %
		Porcentagem Média		
G3LG	Solo Puro	32,27 a	28,44 a	39,28 a*
	T1	48,15 a	27,92 a	23,94 a
	T2	43,43 a	26,41 a	30,16 a
	T3	46,29 a	6,77 a	46,94 a
G4LG	Solo Puro	50,77 a	28,30 a	20,92 a
	T1	66,48 a	15,26 a	18,27 a
	T2	52,68 a	16,32 a	30,99 a
	T3	59,00 a	13,80 a	27,20 a

*Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em que: **G3LG** = Grupo 3 - Lages; **G4LG** = Grupo 4 - Lages; **T1**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal; **T2**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal ; **T3**: Solo+ 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits

3.3.2.2. Consistência do solo

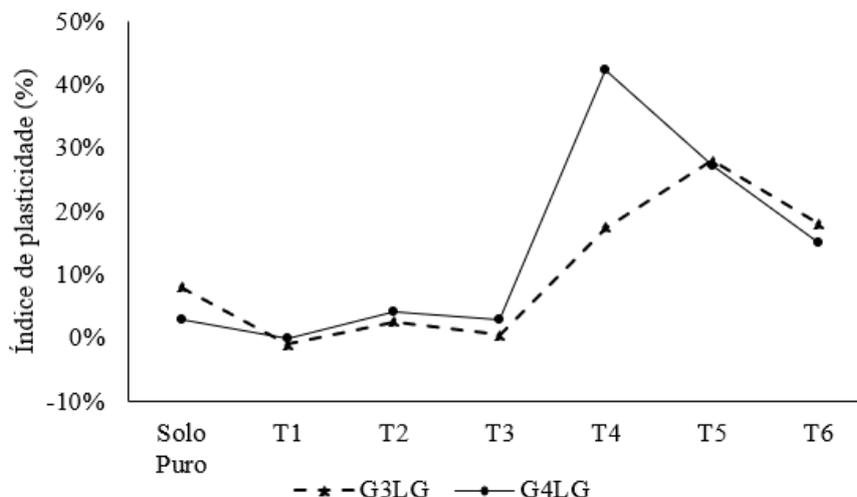
De maneira geral, os tratamentos de 1 a 3 apresentaram valores menores de índice de plasticidade em ambas as áreas, em que o T1 apresentou a maior diminuição no índice com 8,1% de diferença, seguido pelo T3 com 7,6% e por fim pelo T2 em que houve diminuição de 5,4% no índice de plasticidade em relação ao solo puro no G3LG. Já no G4LG a diminuição nos valores de índice de plasticidade causadas pelas misturas (solo + coprodutos) foi um pouco menos expressiva, sendo o T1 novamente responsável pela maior diminuição no valor do índice em relação ao solo puro, com valor de 3,03% de diminuição, seguido pelo T3 com 0,13% de diminuição. Já no T2 ainda para o grupo G4LG houve também um aumento de 0,97% no valor do índice de plasticidade.

Apesar da diminuição nos tratamentos de 1 a 3 ser observada em ambas as áreas, as porcentagens foram maiores nos solos do G3LG, isso pode ter acontecido por se tratarem de solos com maior porcentagem de argila, ou seja, que tem maior capacidade de reagir com os demais componentes adicionados aos solos.

A partir do tratamento 4 (misturas de solo+coprodutos+goma xantana e poliacrilato de sódio) em ambos os grupos de solos, os valores de índices de plasticidade aumentaram muito, variando de um aumento de 9,40% no T4 a 20% no T5 no grupo G3LG e sendo uma variação ainda maior no G4LG de 12,7% no T6 até 39,37% no T4 em relação ao solo puro. Esse grande aumento pode ter sido causado pelo grande aumento da umidade nessas amostras, possivelmente causado pela adição de poliacrilato de sódio, em função de sua alta capacidade higroscópica.

De maneira geral os tratamentos de 1 a 3 tiveram um bom desempenho em diminuir os índices de plasticidade do solo, sendo a diminuição maior nos solos do G3LG em geração aos solos do grupo G4LG. Entretanto, a partir do tratamento 4 em ambos os grupos de solo, os valores de Índice de Plasticidade aumentaram muito. (Figura 11 e Tabela 8).

Figura 11. Índices de plasticidade para os solos puros e diferentes tratamentos.



Em que: **G3LG** = Grupo 3 - Lages; **G4LG** = Grupo 4 - Lages; **T1**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal; **T2**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal ; **T3**: Solo+ 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits; **T4**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana; **T5**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana; **T6**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana.

Fonte: a autora (2022).

Tabela 8. Resultados de limites de liquidez e plasticidade, e índice de plasticidade para os diferentes tratamentos testados.

Solo	Tratamento	LL	LP	IP
G3LG	Solo Puro	51,6%	43,5% a, b	8,10% a, b
G3LG	T1	41,6%	42,6% a	0,0% a
G3LG	T2	41,7%	39,0% a	2,7% a b
G3LG	T3	41,0%	40,5% a	0,5% a
G3LG	T4	96,6%	79,0% d	17,5% c
G3LG	T5	79,9%	51,8% c	28,1% d
G3LG	T6	67,3%	49,1% b, c	18,2% c
G4LG	Solo Puro	35,53%	32,63% a	3,13% a
G4LG	T1	33,1%	33,0% a	0,1% a
G4LG	T2	33,9%	29,7% a	4,1% a
G4LG	T3	32,3%	29,3% a	3,0% a
G4LG	T4	114,9%	72,4% c	42,5% d
G4LG	T5	73,7%	46,4% b	27,3% c
G4LG	T6	65,8%	50,6% b	15,2% b

*Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em que: **LP** = Limite de Plasticidade; **LL** = Limite de Consistência; **IP** = Índice de Plasticidade; **G3LG** = Grupo 3 - Lages; **G4LG** = Grupo 4 - Lages; **T1**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal; **T2**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal ; **T3**: Solo+ 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits; **T4**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana; **T5**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana; **T6**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana.

Fonte: a autora (2022).

No grupo G3LG os tratamentos T1, T2 e T3 não diferiram estatisticamente do solo puro na variável limite de plasticidade, o T4 diferiu de todos os demais tratamentos e do solo puro, tendo o valor mais alto. Para o G4LG os tratamentos T1, T2 e T3 tiveram o mesmo comportamento, não diferindo entre si e nem entre o solo puro. Os tratamentos T5 e T6 também não diferiram entre si e o T4 também teve o maior número de limite de plasticidade nesse grupo de solo, o que indica que esse tratamento foi responsável por uma maior absorção de água no solo, característica importante para o controle de poeiras uma vez que a higroscopicidade é um dos principais mecanismos de atuação no controle de poeiras segundo Parvej et al. (2021), entretanto, esse aumento na absorção de água leva também a um aumento dos índices de plasticidade, o que não é uma característica desejável para construção de estradas, uma vez que segundo Baracho (2021) Em geral, solos com menores índices de plasticidade são preferidos para a construção de estradas ou sub-base de pavimentos rodoviários por serem menos plásticos

No variável índice de plasticidade, apesar de não apresentarem diferenças significativas em relação ao solo puro no grupo G3LG para os tratamentos T1, T2 e T3, os valores de IP foram inferiores quando comparado com o solo puro o que representa um resultado positivo quanto a utilização dessas misturas para a construção de estradas. Já para o mesmo grupo de solo entre os tratamentos T4 e T6 não houveram diferenças significativas na variável IP entretanto os mesmos tiveram diferenças em relação ao T5 responsável pelo maior valor de IP, e também dos demais tratamentos e do solo puro.

No que diz respeito ao solo G4LG, apenas os tratamentos T1 e T3 tiveram índices de plasticidade menores, entretanto T1, T2 e T3 não tiveram diferenças estatísticas em relação ao solo puro. Os demais tratamentos em ambos os grupos de solo tiveram valores de índice de plasticidade muito maiores em função dos maiores limites de liquidez e também se diferenciaram estatisticamente entre si e dos demais tratamentos, uma possível causa para esses resultados seja também a presença de poliacrilato de sódio nas misturas em função de sua alta capacidade de absorção de água, o que fez com que muito mais água precisasse ser adicionada a amostra para realização da análise no limite de liquidez. No trabalho de Vargas (2019), a Grits na porcentagem de 4% causou diminuição no índice de plasticidade quando misturado ao solo, similar ao encontrado no presente trabalho no que se refere ao tratamento T3.

Não foram encontrados na literatura trabalhos em que tenha sido testada areia de leiteo fluidizado associada a solos tanto para estabilização de estradas como para qualquer outro fim, entretanto a diminuição do índice de plasticidade que se mostrou mais expressiva

principalmente nos solos do G3LG que apresentam maior porcentagem de argila em relação ao G4LG, o que pode indicar que por a areia de leito fluidizado possuir partículas maiores, associada ao solo com maior quantidade de argila, ou seja, maior quantidade de partículas finas, possa ter promovido o rearranjo das mesmas, corroborando na diminuição do índice de plasticidade.

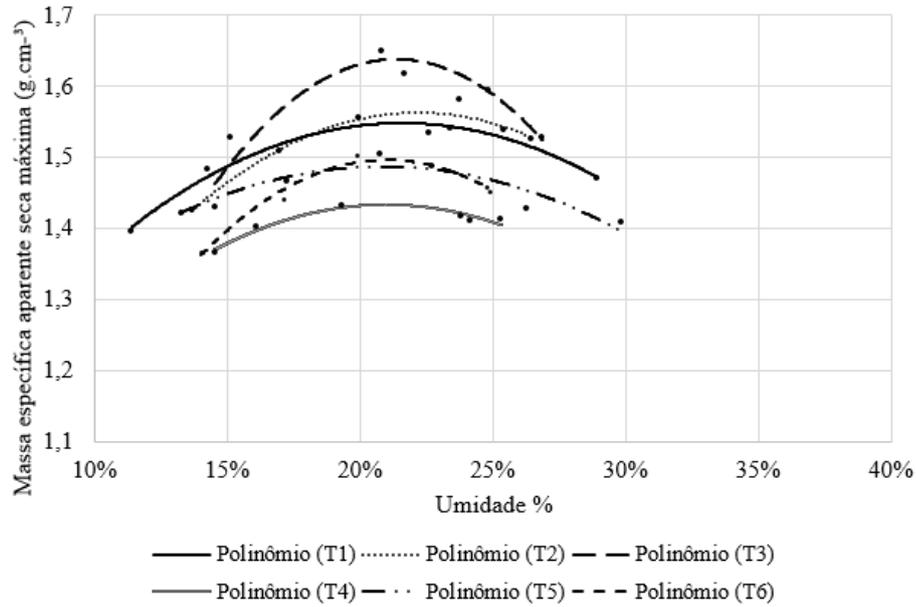
No tratamento 1 em que a mistura de solo foi realizada com cal e areia de leito fluidizado houve a maior diminuição nos índices de plasticidade apesar de a porcentagem de cal utilizada ter sido de 5%, o que se mostra diferente dos resultados encontrados por Arrivabeni (2017) que em seu trabalho mostrou que a partir de 4% de cal as houve um decréscimo na resistência mecânica que pode estar associado a valores mais altos de índices de plasticidade, entretanto no mesmo trabalho o solo utilizado possui cerca de 63% de areia e apenas 13% de argila, o que pode explicar que por conta da maior quantidade de argila nos solos utilizados no presente trabalho, principalmente no G3LG onde houve o maior decréscimo nos índices de plasticidade em relação ao solo puro, esteja associada a maior quantidade de argila representado uma maior quantidade de solo reagindo com a cal.

Huang et al. (2020) encontrou que o poliacrilato de sódio associado a outros componentes se mostrou uma boa alternativa para o controle de poeiras, entretanto as misturas com poliacrilato de sódio mesmo na proporção de 0,5% não apresentaram bons resultados para fins de construção de estradas, uma vez que aumentaram muito os índices de plasticidade e diminuíram a densidade em ambos os grupos de solo avaliados.

3.3.2.3. Curvas de compactação em energia normal

Os resultados das análises de compactação na energia normal, para os diferentes tratamentos apresentados nas Figura 12 e 13 (curvas de compactação) e 14 e na Tabela 9, indicaram que no solo G3LG houve um pequeno acréscimo na massa específica aparente seca máxima nos tratamentos T1, T2, e T3 ao comparar os valores com a massa específica aparente seca máxima do solo puro, entretanto para os solos da mesma área nos demais tratamentos ouve um decréscimo da massa específica aparente seca máxima em relação ao valor da análise apenas com solo puro. Já para os solos G4LG, em todos os tratamentos os valores de massa específica aparente seca máxima foram inferiores ao valor para solo puro com exceção apenas do T3. Do ponto de vista construtivo, maiores valores de massa específica aparente seca máxima são melhores, visto que a resistência tem forte relação com a densidade do solo (PINTO, 2006).

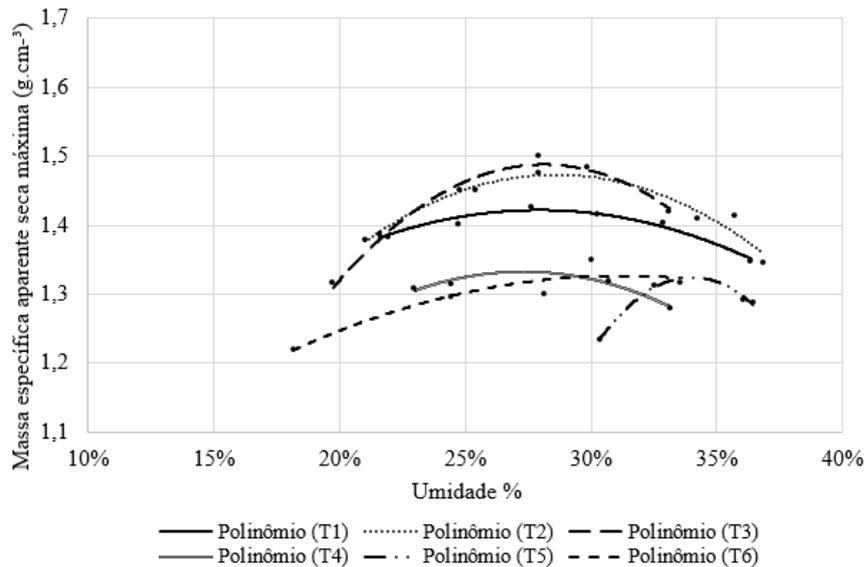
Figura 12. Curvas de compactação para os tratamentos de 1 a 6 do grupo G3LG.



Em que: **G3LG** = Grupo 3 - Lages; **G4LG** = Grupo 4 - Lages; **T1:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal; **T2:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal ; **T3:** Solo+ 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits; **T4:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana; **T5:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana; **T6:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana.

Fonte: A autora (2022)

Figura 13. Curvas de compactação para os tratamentos de 1 a 6 do grupo G3LG.



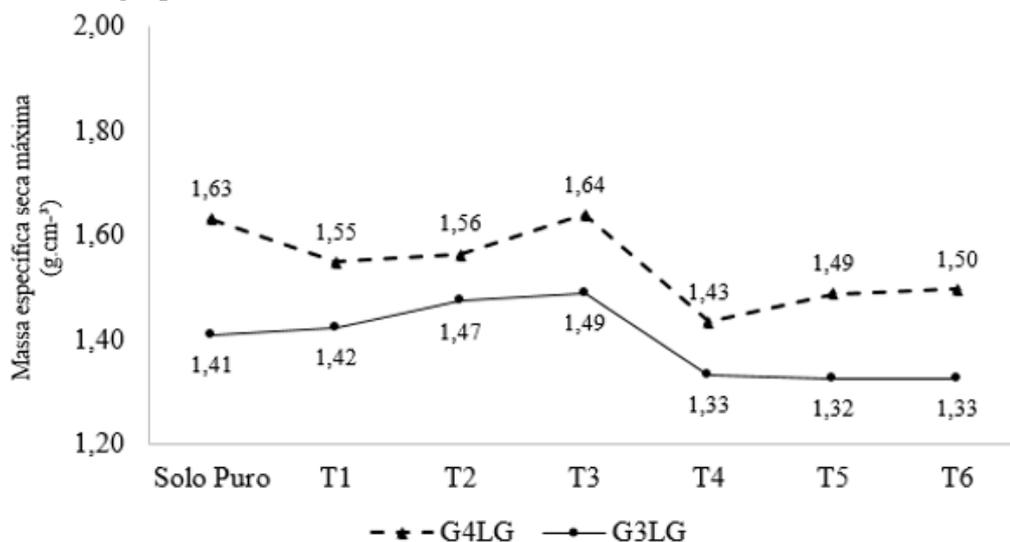
G3LG = Grupo 3 - Lages; **G4LG** = Grupo 4 - Lages; **T1:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal; **T2:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal ; **T3:** Solo+ 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits; **T4:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana; **T5:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana; **T6:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana.

Fonte: A autora (2022)

Quanto as variações em relação ao solo puro para os três primeiros tratamentos, no G3LG em que as variações foram maiores em relação ao G4LG, nos tratamentos T1 e T3 houve diminuição de 3,2% na umidade ótima de compactação e no T2 de 2,2%. Nesses tratamentos houve um aumento na massa específica aparente seca máxima de compactação sendo a maior diferença no T3 com aumento de 0,08 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), seguido pelo T2 com 0,06 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), e por fim pelo T1 no qual houve 0,01 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) nesta variável. Já no G4LG houve aumento de 0,9% na umidade ótima de compactação no T1 e T2 e de 0,1% no T3. Para este grupo, os tratamentos 1, 2 causaram diminuição na massa específica aparente seca máxima de compactação em comparação com o solo puro. Sendo de 0,08 a menos no T1, 0,07 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) no T2. No T3 houve um aumento de 0,01 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) na mesma variável.

Nos tratamentos T4, T5 e T6 houve aumento na umidade ótima de compactação somente no T5 no grupo de solo G3LG com 2,8% de aumento em relação ao solo puro. No T4 do mesmo grupo houve diminuição de 4,2% e de 0,2% no T6. Já para a massa específica aparente seca máxima de compactação no G3LG houve diminuição de 0,08 nos tratamentos 4 e 6 e de 0,09 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) no T5. No G4LG nos tratamentos 4, 5 e 6 houve diminuição de 0,1% na umidade ótima de compactação comparando-se com o solo puro, e diminuição de 0,2 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) no T4 para a massa específica aparente seca máxima de compactação, seguida por diminuição de 0,14 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) no T5 e 0,13 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) no T6.

Figura 14. Massa específica aparente máxima de compactação para os solos puros e respectivos tratamentos dos grupos G3LG e G4LG.



Em que: **G3LG** = Grupo 3 - Lages; **G4LG** = Grupo 4 - Lages; **T1**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal; **T2**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal; **T3**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits; **T4**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma

Xantana; **T5:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana; **T6:** Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana.

Fonte: a autora (2022).

Tabela 9. Umidade Ótima e Massa específica aparente seca máxima estimadas por meio das curvas das análises de compactação para os diferentes tratamentos considerando os solos da área II.

Tratamento	Tipo Solo	Umidade Ótima	Massa específica aparente seca Máxima (g.cm ⁻³)	Equação	R ²
T1	G3LG	28%	1,42	$M_{máx} = -9,976x^2 + 5,5711x + 0,6441$	0,9499
T2	G3LG	29%	1,47	$M_{máx} = -16,81x^2 + 9,6164x + 0,0981$	0,9112
T3	G3LG	28%	1,49	$M_{máx} = -25,44x^2 + 14,303x - 0,5223$	0,9836
T4	G3LG	27%	1,33	$M_{máx} = -14,798x^2 + 8,0746x + 0,2311$	0,9302
T5	G3LG	34%	1,32	$M_{máx} = -66,881x^2 + 45,485x - 6,4091$	0,9889
T6	G3LG	31%	1,33	$M_{máx} = -6,3071x^2 + 3,9386x + 0,7117$	0,8821
T1	G4LG	22%	1,55	$M_{máx} = -14,099x^2 + 6,0847x + 0,8922$	0,9667
T2	G4LG	22%	1,56	$M_{máx} = -19,022x^2 + 8,4432x + 0,6264$	0,9376
T3	G4LG	21%	1,64	$M_{máx} = -37,591x^2 + 16,064x - 0,0776$	0,9003
T4	G4LG	21%	1,43	$M_{máx} = -15,233x^2 + 6,3927x + 0,7632$	0,9197
T5	G4LG	21%	1,49	$M_{máx} = -11,258x^2 + 4,6957x + 0,9978$	0,8503
T6	G4LG	21%	1,50	$M_{máx} = -27,256x^2 + 11,46x + 0,2923$	0,9704

Em que: **G3LG** = Grupo 3 - Lages; **G4LG** = Grupo 4 - Lages; **MMáx**: Massa específica aparente seca máxima de compactação **T1**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal; **T2**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal ; **T3**: Solo+ 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits; **T4**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana; **T5**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Lama de Cal + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana; **T6**: Solo + 15% Areia de Leito Fluidizado + 5% Grits + 0,5% Poliacrilato de Sódio + 1% de Goma Xantana.

Fonte: a autora (2022).

De maneira geral, para os solos agrupados como G3LG, os tratamentos T1, T2 e T3 resultaram em um aumento na massa específica aparente seca máxima em relação ao solo puro obtida por meio da análise de compactação, já nos solos do grupo G4LG o único tratamento no qual houve um acréscimo na massa específica aparente seca máxima foi o T3. Uma possível explicação para o aumento na densidade ser mais expressivo no grupo G3LG pode ser associada ao fato de que os solos desse grupo possuem originalmente uma porcentagem de argila maior em relação aos solos do grupo G4LG, de forma que a mistura deste solo com a areia de caldeira que possui partículas de tamanho maior possa ter equilibrado a granulometria e, portanto, causado aumento na massa específica aparente seca máxima, entretanto não foram encontrados trabalhos na literatura associando esse coproduto ao solo visando estabilização, impossibilitando a comparação de valores para as variáveis analisadas.

Já nos solos do G4LG, como os valores porcentagem de areia do solo puro foram originalmente maiores, o acréscimo das misturas contendo areia de caldeira não resultou em acréscimo na massa específica aparente seca máxima para quase todos os tratamentos. O que

indica que ao ser misturada com solos mais argilosos, e com maior porcentagem de finos, a areia de caldeira pode se comportar bem, resultando até em pequenos aumentos na massa específica aparente seca máxima. Vargas (2019) encontrou que as misturas com *grits* podem ser promissoras do ponto de vista construtivo, uma vez que representaram incrementos na massa específica aparente seca máxima, resultado similar ao encontrado nesse estudo no que diz respeito ao tratamento T3.

Machado et al. (2007) encontrou em seu trabalho que a lama de cal na porcentagem de 25% associada a cascalho foi capaz de aumentar em 1,42 (g.cm^{-3}) a massa específica aparente seca máxima em relação ao puro. Os autores ainda demonstram que demonstrando o coproduto possui potencial como estabilizante químico de solos. Entretanto no presente trabalho no tratamento 5 que associa lama de cal com areia de leito fluidizado, poliacrilato de sódio e goma xanta, houve uma diminuição de 0,14 (g.cm^{-3}) na massa específica aparente seca máxima em relação ao puro. Portanto esse valor pode não estar associado somente a lama de cal, mas também aos demais componentes da mistura, principalmente pode ter se dado em função da presença do poliacrilato de sódio e sua alta absorção de água como discutido anteriormente.

Os tratamentos T4, T5 e T6 causaram diminuição na massa específica aparente seca máxima em relação aos solos puros de ambos os grupos, uma possível explicação para tal seja a presença do poliacrilato de sódio presente nesses três tratamentos. Devido a sua alta capacidade de absorção de água o poliacrilato de sódio faz com que a umidade ótima de compactação aumente muito, além de que as partículas deste componente acabam aumentando muito de tamanho quando entram em contato com a água, o que acaba prejudicando a compactação do solo com essas misturas e acarretando em uma menor massa específica aparente seca máxima.

3.4. CONCLUSÕES

Os solos da área experimental localizada em Lages se destacam por seu elevado percentual de argila em relação aos solos da área localizada em Correia Pinto, por conta das condições operacionais e, portanto, da sugestão da empresa apoiadora no projeto somente o solo da área experimental de Lages foi considerado para os testes em laboratório.

Entre os grupos G3LG e G4LG existem diferenças principalmente no percentual de argila, em que a média de argila do G3LG é 18,49% maior que a do G4LG. Essas diferenças impactaram diretamente a o efeito dos tratamentos, de forma que no solo G3LG a diminuição no índice de plasticidade e aumento na massa específica aparente seca máxima dos solos foi mais expressiva em relação aos solos do G4LG.

De maneira geral os tratamentos compostos apenas pelos coprodutos (areia de leite fluidizado e cal, lama de cal ou *grits*) apresentaram melhores resultados causando redução nos índices de plasticidade em ambos os tipos de solo, variando de 5,4 a 8,1% no G3LG e no G4LG um pouco menos expressiva variando entre 0,13 e 3,03% e um aumento de até 0,08 na massa específica aparente seca máxima dos solos do grupo G3LG, o que indica que as misturas contendo areia de leite fluidizado em até 15%, associados a cal, lama de cal e *grits* nas porcentagens de 5% podem melhorar ainda que pouco as características mecânicas de solos similares aos do grupo G3LG.

Os demais tratamentos (T4, T5 e T6) de maneira geral causaram aumento nos índices de plasticidade e diminuição na massa específica aparente seca máxima dos solos características que não são adequadas para construção de estradas, essas alterações nas características podem estar associadas principalmente a alta capacidade de absorção de água presente no poliacrilato de sódio, o que indica que a possível utilização desse componente para o controle de poeiras deve ser realizado com cautela.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Brasil as pesquisas relacionadas a controle de poeiras em estradas não pavimentadas (rurais e florestais) ainda é muito incipiente, praticamente não existem trabalhos relacionados ao tema, que é de grande importância para a melhoria das condições de trafegabilidade dessas vias, além da melhoria da qualidade de vida das comunidades localizadas próximas a essas estradas.

Como sugestões para pesquisas futuras seria interessante:

- Comparar as metodologias já existentes para mensuração de poeiras, verificando se os métodos são eficientes e correspondem a realidade, buscando alternativas de mensuração de poeiras que sejam mais econômicas e de fácil execução;
- Realizar testes experimentais em diferentes tipos de solos brasileiros com produtos amplamente testados e que trouxeram bons resultados como cloreto de cálcio e magnésio, e avaliar se são economicamente viáveis para cada situação;
- Buscar testar componentes que combinem alta capacidade higroscópica, com componentes de ação aglutinante combinando assim os dois principais mecanismos de supressão de poeiras.

5. REFERÊNCIAS

AGLIO, Mário Luiz Diamante et al. O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada. **Rio de Janeiro: Embrapa Solos**, 2011.

AL-SWAIDANI, A.; HAMMOUD, I.; MEZIAB, A. Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, China, v. 8, p. 714-725, jul. 2016

ALZUBAID, Hossein. **Operation and maintenance of gravel roads – A Literature Study**. 1999.

ARRIVABENI, Breno Santos. **ALTERNATIVAS PARA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E QUÍMICA DE SOLO DE ESTRADAS FLORESTAIS**. 2017. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

BARACHO, Gabriela Oliveira; CORREIA, Natalia de Souza. Viabilidade de misturas de solo laterítico argiloso com cinza do bagaço da cana para construção de estradas rurais. **Geama - Ciências Ambientais e Biotecnologia**, São Paulo, v. 2, n. 7, p. 21-27, ago. 2021.

BARAJAS, J.H. Síntese à nível de laboratório de poliacrilato de sódio de baixo peso molecular para a indústria cerâmica: comparação de diferentes alternativas de sínteses. **Iberoamericana de Polímeros**, v.11, n.6, p.392-406, 2010.

BECKER, D.L.; TAKLE, E.s.. Particulate deposition from dry unpaved roadways. **Atmospheric Environment (1967)**, v. 13, n. 5, p. 661-668, jan. 1979. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0004-6981\(79\)90195-1](http://dx.doi.org/10.1016/0004-6981(79)90195-1).

BOGACKI, Marek *et al.* Re-entrained road dust PM10 emission from selected streets of Krakow and its impact on air quality. **E3S Web Of Conferences**, v. 28, p. 01003, 2018. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/20182801003>.

CORRÊA, Carla Maria Camargo. **Perdas de solo e a qualidade da água precedente de uso florestal no planalto catarinense**. Curitiba, PR: UFPR, 2005. 155p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CORRÊA, C. M. C.; MALINOVSKI, R. J. Bases para planejamento de rede viária em reflorestamento no sul do Brasil. **Floresta**, v. 36, n. 2, 2006.

DANG, Xugang; SHAN, Zhihua. Dust pollution and control with leather waste. **Environmental Chemistry Letters**, v. 16, n. 2, p. 427-437, 1 dez. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10311-017-0683-6>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNER ME 051/94**: Solos: Solos – análise granulométrica. Rio de Janeiro: 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNER ME 080/94**: Solos: Sedimentação. Rio de Janeiro: 1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNER ME 129/94**: Solos: Compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro: 1994c.

DIAS, L. *et al.* Modeling a computer application for management of maintenance activities of unpaved roads. **Árvore**, v. 39, n. 4, 723-731, 2015.

DIXON-HARDY, Darron William *et al.* The Use of Oil Refinery Wastes as a Dust Suppression Surfactant for Use in Mining. **Environmental Engineering Science**, v. 25, n. 8, p. 1189-1196, out. 2008. Mary Ann Liebert Inc. <http://dx.doi.org/10.1089/ees.2007.0177>.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **IPR – 719: Manual de pavimentação**. 3ª edição. Rio de Janeiro: 2006.

EPA unpaved roads - EPA. . Miscellaneous Sources, in Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, AP-42, Fifth ed. Ch. 13.2, pp1–2. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina), 1995.

EPPS, Amy; EHSAN, Mehbuba. Laboratory Study of Dust Palliative Effectiveness. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 14, n. 5, p. 427-435, out. 2002. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2002\)14:5\(427\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2002)14:5(427)).

ETYEMEZIAN, V. Vehicle-based road dust emission measurement: i.: methods and calibration. **Atmospheric Environment**, v. 37, n. 32, p. 4559-4571, out. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1352-2310\(03\)00528-4](http://dx.doi.org/10.1016/s1352-2310(03)00528-4).

FOELKEL, Celso. Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto. Parte 05: Resíduos Mineraiis. out. 2011.

GALVÃO, Taís Freire; PEREIRA, Mauricio Gomes. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 23, n. 1, p. 183-184, mar. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.5123/s1679-49742014000100018>.

GILLIES, J.A., *et al.* 1999. Long term efficiencies of dust suppressants to reduce PM10 emissions from unpaved roads. **The Journal of the Air and Waste Management Association** 49, 3–16.

GIUMMARRA, George J.; FOLEY, Graham; CROPLEY, Stephen. Dust Control: australasian experiences with various chemical additives. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1589, n. 1, p. 50-53, jan. 1997.

GILMOUR, David. Dust Suppressant Comprising Microbes, 2013. **World Intellectual Property Organization WO 2013/086611 A1**, 12 December 2013.

GOOSSENS, Dirk; BUCK, Brenda J.. Can BSNE (Big Spring Number Eight) samplers be used to measure PM10, respirable dust, PM2.5 and PM1.0? **Aeolian Research**, v. 5, p. 43-49, ago. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeolia.2012.03.002>

HAN, Sehyun; YOUN, Jong-Sang; JUNG, Yong-Won. Characterization of PM10 and PM2.5 source profiles for resuspended road dust collected using mobile sampling

methodology. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 20, p. 3343-3351, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.04.015>.

HUANG, Zhian *et al.* Preparation and characterization of an environmentally friendly compound chemical agent for road dust suppression in a copper mine. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 40, n. 1, 10 out. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ep.13532>.

ICEPA – Instituto de Planejamento e Economia Agrícola de Santa Catarina. **Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional – SDR LAGES: Caracterização Regional**. Secretaria de Estado do Planejamento, Orçamento e Gestão. Florianópolis. 2003. 36p

JÄRUP, Lars. Hazards of heavy metal contamination. **British Medical Bulletin**, v. 68, n.1, p. 167-182, 1 dez. 2003. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/bmb/ldg032>.

JONES, David; SADZIK, E; WOLMARANS, E. The incorporation of dust palliatives as a maintenance option in unsealed road management systems. **20th Arrb Conference**, mar. 2001.

JONES, David *et al.* **Unpaved Road Dust Management, A Successful Practitioner's Handbook**. Federal Highway Administration (US), 2013.

KATRA. Comparison of Diverse Dust Control Products in Wind-Induced Dust Emission from Unpaved Roads. **Applied Sciences**, v. 9, n. 23, p. 5204, 29 nov. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app9235204>.

MACHADO, Carlos Cardoso *et al.* Análise técnica e avaliação de trechos experimentais de misturas solo-lama de cal com vistas a aplicações em estradas florestais. **Revista Árvore**, v. 31, p. 265-274, 2007.

MACHADO, C.C. **Construção e Conservação de Estradas Rurais e Florestais**. Viçosa: UFV, 2013.

MALINOVSKI, J. R. *et al.* **Código de prática para estradas florestais**. Otacílio Costa: Malha Viária Logística de Estradas, 2004. Apostila.

MONLUX, Stephen. Stabilizing Unpaved Roads with Calcium Chloride. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1819, n. 1, p. 52-56, jan. 2003. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/1819b-07>.

OLENIK, Luis Paulo. **ANÁLISE DE ESTABILIZAÇÃO COM CIMENTO DE ARGILAS SEDIMENTARES DE JOIVILLE-SC**. 2016. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

PARVEJ, Subbir, *et al.* Fugitive Dust Suppression in Unpaved Roads: state of the art research review. **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. /2399, 23 fev. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su13042399>.

PEREIRA, R.S.; EMMERT, F.; MIGUEL, E. P.; MOTA, F.C.M.; REZENDE, A. V.; LEAL, F. A. Estabilização mecânica de solos como alternativa na construção de estradas florestais de baixo custo. **Floresta e Ambiente**, v. 5, n. 3, p. 212-217, 2017.

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

REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA - SBQ, 25., 2002, Rio Claro. **ESTUDOS DE BIODEGRADAÇÃO DE POLIACRILATO DE SÓDIO, utilizando Phanerochaete chrysosporium**. Rio Claro, 2002. 2 p.

ROBERTS, John W.; WATTERS, Harry A.; MANGOLD, Carl A.; ROSSANO, August T.. Cost and Benefits of Road Dust Control in Seattle's Industrial Valley. **Journal Of The Air Pollution Control Association**, v. 25, n. 9, p. 948-952, set. 1975. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00022470.1975.10468117>.

RUSHING, John F. *et al.* Evaluation of Dust Palliatives for Unpaved Roads in Arid Climates. **Journal Of Performance Of Constructed Facilities**, v. 20, n. 3, p. 281-286, ago. 2006. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3828\(2006\)20:3\(281\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0887-3828(2006)20:3(281)).

RUSHING, John F.; HARRISON, Andrew; TINGLE, Jeb S.; MASON, Quint; MCCAFFREY, Tim. Evaluation of Dust Palliatives for Unpaved Roads in Arid Climates. **Journal Of Performance Of Constructed Facilities**, v. 20, n. 3, p. 281-286, ago. 2006. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3828\(2006\)20:3\(281\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0887-3828(2006)20:3(281)).

SAHA, Promotes; KSAIBATI, Khaled. Effectiveness of the two chemical treatments (CaCl₂ and MgCl₂) as dust suppressants on gravel roads. **International Journal Of Pavement Engineering**, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 332-339, 7 abr. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2020.1745799>.

SAMPAIO, I. S et al. **Estabilização enzimática de solo para pavimento de estradas florestais**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. 2019.

SANDERS, Thomas G.; QUAYENORTEY, Jonathan A.; JORGENSEN, Dan. Unpaved Road Dust Control in the Piceance Creek Basin in Rio Blanco County, Colorado. **Journal Of Transportation Engineering**, [S.L.], v. 141, n. 2, fev. 2015. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)te.1943-5436.0000706](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)te.1943-5436.0000706).

SANT' ANNA, Giovanni Levi. **Estradas florestais: caracterização geotécnica e comportamento mecânico de solos e misturas solo-grits, cargas de tráfego e seus efeitos**. 2006. 128 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

TINGLE, Jeb S.; NEWMAN, J. Kent; LARSON, Steve L.; WEISS, Charles A.; RUSHING, John F.. Stabilization Mechanisms of Nontraditional Additives. **Transportation Research Record**: Journal of the Transportation Research Board, [S.L.], v. 1989-2, n. 1, p. 59-67, jan. 2007. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/1989-49>

THENOUX, Guillermo; BELLOLIO, Juan Pablo; HALLES, Felipe. Development of a Methodology for Measurement of Vehicle Dust Generation on Unpaved Roads. **Transportation Research Record**: Journal of the Transportation Research Board, v. 1989-1, n. 1, p. 299-304, jan. 2007. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/1989-35>.

Transporte rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos. – Brasília : CNT, 2017.

TRINDADE, T. P. et al. **Compactação dos solos: fundamentos teóricos e práticos**. Viçosa, MG: UFV, 2008. 95p.

VARGAS, Oielor Felipe. **ALTERNATIVAS PARA ESTABILIZAÇÃO DO PAVIMENTO DE ESTRADAS FLORESTAIS E CONSTRUÇÃO DE TRECHOS EXPERIMENTAIS**. 2019. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Florestal, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019

WEI, Jianfeng, *et al.* Environment-friendly dual-network hydrogel dust suppressant based on xanthan gum, polyvinyl alcohol and acrylic acid. **Journal Of Environmental Management**, v. 295, p. 113139, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113139>.

Wu, X. *et al.* Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide cross-sectional study. **medRxiv** 2020.

YAN, Wei; HOEKMAN, S. Kent. Dust Suppression with Glycerin from Biodiesel Production: a review. **Journal Of Environmental Protection**, v. 03, n. 02, p. 218-224, 2012. Scientific Research Publishing, Inc.. <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2012.32027>.