

**OIELER FELIPE VARGAS**

**ALTERNATIVAS PARA ESTABILIZAÇÃO DO PAVIMENTO DE ESTRADAS  
FLORESTAIS E CONSTRUÇÃO DE TRECHOS EXPERIMENTAIS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, na Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Dr. Jean Alberto Sampietro  
Co-orientador: Dr. Marcio Carlos Navroski

**LAGES**

**2019**

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

Vargas, Oieler Felipe

ALTERNATIVAS PARA ESTABILIZAÇÃO DO  
PAVIMENTO DE ESTRADAS FLORESTAIS E CONSTRUÇÃO  
DE TRECHOS EXPERIMENTAIS / Oieler Felipe Vargas. -- 2019.  
123 p.

Orientador: Jean Alberto Sampietro

Coorientador: Marcio Carlos Navroski

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa  
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2019.

1. Solo-resíduos. 2. Estabilização. 3. ISC. 4. URCI. I. Sampietro,  
Jean Alberto. II. Navroski, Marcio Carlos. III. Universidade do  
Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. IV. Título.

**OIELER FELIPE VARGAS**

**ALTERNATIVAS PARA ESTABILIZAÇÃO DO PAVIMENTO DE ESTRADAS  
FLORESTAIS E CONSTRUÇÃO DE TRECHOS EXPERIMENTAIS**

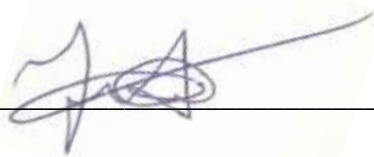
Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, na Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

**Banca examinadora**

Orientador: \_\_\_\_\_

Dr. Jean Alberto Sampietro

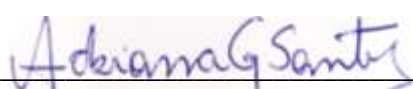
Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC/CAV)



Membro interno: \_\_\_\_\_

Dra. Adriana Goulart dos Santos

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC/CCT)



Membro externo: \_\_\_\_\_

Dr. Reginaldo Sérgio Pereira

Universidade Federal de Brasília (UnB)



**Lages, 31 de Maio de 2019**



Dedico este trabalho aos meus pais pelo esforço que sempre fizeram para que eu tivesse a oportunidade de estudar e chegar até aqui.



## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela grandeza da vida! Por ter me mantido no caminho de pé;

Aos meus pais, pelo amor e apoio incondicional;

Aos meus irmãos, por entenderem as nossas diferenças e por sempre estarem ao meu lado, enfrentando os ventos contrários;

A minha namorada, pela presença diária e por seu constante apoio, incentivando-me na busca do crescimento profissional e pessoal;

Ao Prof. Dr. Jean Alberto Sampietro, pela oportunidade de ter sido seu orientado. Agradeço por todo ensinamento científico e pessoal, pela paciência, dedicação e estímulo dado durante todo o Mestrado;

Ao Prof. Dr. Marcio Carlos Navroski, pela ajuda e incentivo em todas as etapas da minha pesquisa. Pelos conselhos profissionais e pessoais dados durante todo esse tempo;

Aos colegas de Laboratório de Operações e Estradas Florestais (LOPEF) por toda a contribuição durante o período do Mestrado e pelo convívio que enriqueceram meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade do Estado de Santa Catarina, por ter concedido a oportunidade de cursar o Mestrado e desenvolver este trabalho;

Aos membros da banca examinadora, por aceitarem fazer parte desse trabalho e contribuir com os seus conhecimentos;

A FUMDES pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento parcial dessa pesquisa;

A empresa Klabin e toda sua equipe pelo apoio técnico e operacional despendido durante a execução desta pesquisa;

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, o meu MUITO OBRIGADO...



“Se você quer chegar onde a maioria não chega,  
faça o que a maioria não faz”

Bill Gates



## RESUMO

A demanda cada vez maior por madeira entregue nos pátios das fábricas, principalmente, para as empresas de papel e celulose, exige que o transporte seja executado de maneira eficiente e com veículos longos, apresentando capacidade de carga cada vez maiores. Estas condições de transporte geram necessidades de estradas extremamente trafegáveis, com alta qualidade e vida útil longa. Entretanto essas exigências não são observadas na maioria das situações. Assim, identificar os problemas envolvidos na construção de estradas florestais, estudar técnicas de estabilização e avaliar o desempenho de diferentes pavimentos é de extrema importância para o setor. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o comportamento mecânico de solos e materiais para a estabilização química e mecânica, bem como avaliar o desempenho de diferentes composições de pavimentos em estradas florestais. Para tanto, foram desenvolvidos dois estudos: 1º) Foram testados estabilizantes de solo-resíduos (*Grits*, *Dregs*, Lama de Cal), nas proporções de 2, 4, 8 e 16% em relação ao peso do solo padrão seco, gerando 12 combinações. Todos os tratamentos foram avaliados quanto aos índices de *Atterberg*, ensaio de compactação de *Proctor*, Índice de Suporte Califórnia – ISC e Expansão, e a classificação TRB do solo. 2º) Foram avaliados misturas para a estabilização química (solo-cimento 2, 4, 8 e 16%, idem estudo anterior) e mecânica, utilizando dois tipos de solo (solo padrão e solo jazida) e dois tipos de cascalho basáltico (cascalho padrão e cascalho alternativo), 12 misturas entre solos e cascalhos nas proporções de 30, 50 e 70%. Para cada mistura foi realizada análise granulométrica, ensaio de compactação de *Proctor*, Índice de Suporte Califórnia - ISC, expansão e classificação TRB e USCS para os solos. E foram selecionadas 9 diferentes composições baseados nos resultados de ISC dos ensaios anteriores, e foi construído um trecho experimental. Foi realizado tráfego com veículos do tipo Bitrem de 7 eixos, e simulado precipitação por meio de aplicação de água com caminhão pipa, para avaliar o desempenho de cada seguimento, pelo método do *Unsurface Road Condition Index* (URCI) para cada seguimento. A classificação TRB para o solo padrão e solo jazida foi A4 e A5 respectivamente, sendo estes classificados como ruim a mal para uso rodoviário. A avaliação química demonstrou que apenas o cimento apresentou ganhos satisfatórios em todos os percentuais de mistura quanto ao ISC e reduções no índice de plasticidade. Os ensaios mecânicos demonstraram que a medida em que se aumenta o percentual de cascalho, a umidade ótima reduz e densidade máxima aumenta. A avaliação do desempenho demonstrou que as misturas 2 (camada de revestimento com mix de Cascalho padrão 85% + Solo jazida 15%), 3 (Camada de revestimento com mix de Cascalho padrão 80% + Pó de pedra (pedrisco) 20%), 8 (Camada de revestimento com mix de Cascalho padrão 70% + Solo jazida 30% e melhoria no subleito com aplicação de 2% de Cimento *Portland*) e 9 (Camada de revestimento com Cascalho padrão 100% e melhoria no subleito com aplicação de 2% de Cimento *Portland*), apresentaram resultados satisfatórios quanto ao índice de condição de rodovia não pavimentada, mesmo as misturas 2 e 3 não sendo dimensionadas. As misturas 8 e 9 foram dimensionadas, e receberam um tratamento com 2% de cimento no leito, auxiliando para um melhor desempenho.

**Palavras-chave:** Solo-resíduos, estabilização, ISC, URCI.



## ABSTRACT

The increasing demand for wood delivered on the factory yards, especially for pulp and paper companies, requires that transportation be performed efficiently and with long vehicles, with increasing load capacity. These transport conditions generate extremely high traffic needs with high quality and long service life. However, these requirements are not observed in most situations. Thus, identifying the problems involved in the construction of forest roads, studying stabilization techniques and evaluating the performance of different pavements is of extreme importance for the sector. The objective of this research was to evaluate the mechanical behavior of soils and materials for chemical and mechanical stabilization, as well as to evaluate the performance of different pavement compositions on forest roads. In order to do this, two studies were developed: 1) Soil-residue stabilizers (Grits, Dregs, Lama de Cal) were tested in the proportions of 2, 4, 8 and 16% in relation to the dry standard soil weight, generating 12 combinations. All treatments were evaluated for the Atterberg indices, Proctor compaction assay, California Support Index - ISC and Expansion, and soil TRB classification. 2) Mixtures were evaluated for chemical stabilization (soil-cement 2, 4, 8 and 16%, idem previous study) and mechanical, using two types of soil (standard soil and soil deposit) and two types of basaltic gravel (standard gravel and alternative gravel), 12 mixtures between soils and gravels in the proportions of 30, 50 and 70%. For each mixture, particle size analysis, Proctor compaction assay, California - ISC Support Index, expansion and TRB and USCS classification for soils were performed. And 9 different compositions were selected based on the ISC results of the previous trials, and an experimental section was constructed. Traffic with 7-axis Bitrem type vehicles and simulated rainfall by means of water application with kite truck was used to evaluate the performance of each follow-up by the Unsurface Road Condition Index (URCI) method for each follow-up. The TRB classification for the standard soil and ground soil was A4 and A5 respectively, being these classified as bad to bad for road use. The chemical evaluation showed that only cement presented satisfactory gains in all mixing percentages for ISC and reductions in plasticity index. The mechanical tests showed that as the percentage of gravel increases, the optimum moisture reduces and maximum density increases. The performance evaluation showed that mixtures 2 (coating layer with standard 85% Gravel mix + 15% Soil Layer), 3 (80% Standard Gravel Mixing Layer + 20% Stone Puff) 8 (Coating layer with standard Gravel mix 70% + Soil 30% and improvement in soil with 2% application of Portland cement) and 9 (Coating layer with standard Gravel 100% and improvement in soil with application of 2% of Portland Cement), presented satisfactory results regarding the unpaved highway condition index, even mixtures 2 and 3 were not dimensioned. Mixtures 8 and 9 were sized and treated with 2% cement in the bed, aiding for a better performance.

**Keywords:** Soil-waste, stabilization, ISC, URCI.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema unificado de Classificação de solos.....	37
Figura 2. Fluxograma da produção e recuperação do processo kraft, demonstrando a geração dos resíduos Grits, Dregs e Lama de cal. ....	43
Figura 3. Mapa de localização do local de coleta de solo para o estudo. ....	50
Figura 4. Processo de polpação kraft, linha verde, vermelha e cinza.....	51
Figura 5. Fluxograma da produção de resíduos Dregs, Grits e Lama de cal, no processo de fabricação de celulose.....	53
Figura 6. Amostra de solo armazenado em saco plástico (esquerda), material peneirado, (direita). ....	54
Figura 7. Curva granulométrica do solo puro.....	57
Figura 8. Índices de Consistência para as misturas de Solo-resíduos Dregs (A), Grits (B) e Lama de Cal (C). ....	58
Figura 9. Atividade da argila em função do valor de índice de plasticidade, para as misturas de solo-resíduo Dregs (A), Grits (B) e Lama de Cal (C). ....	61
Figura 10. Curvas de compactação para as misturas de solo-resíduo, em comparação ao solo puro Grits (a), Dregs (b) e Lama de Cal (c), e suas respectivas umidades ótimas e densidades máximas observada Grits (d), Dregs (e) e Lama de Cal (f).....	62
Figura 11. Referente aos ISC, expansão e densidade na moldagem do ISC obtido para as misturas de solo-resíduos <i>Dregs</i> (a, d), <i>Grits</i> (b, e) e Lama de Cal (c, f).....	64
Figura 12. Coeficientes de Correlações linear de Spearman, entre o ISC vs Limite de Plasticidade (a); Índice de Plasticidade (b); Atividade da Argila (c); Expansão (d); Umidade ótima (e); Densidade Máxima (f); Densidade no ISC (g); Umidade no ISC (h).....	66
Figura 13. Croqui de localização da área em estudo. ....	76
Figura 14. Misturas e suas respectivas camadas em centímetro.....	82
Figura 15. Demonstração da motoniveladora (a) e rolo compactador, pé-de-carneiro (b). ....	83
Figura 16. Controle de umidade pelo método da frigideira, e secagem com fogareiro (a) e coleta de amostras de anéis metálicos no solo para o controle de compactação.....	83
Figura 17. Demonstração da retroescavadeira (a) realizando o carregamento das misturas, e caminhão basculante (b) realizando a descarga das misturas no trecho experimental. ....	84
Figura 18. Aplicação de cimento no solo (a) e homogeneização do cimento com o solo, por meio de gradagem (b). ....	84
Figura 19. Demonstrativo de um seguimento de 30 metros, que caracteriza um dos trechos utilizados no referido experimento. ....	85

Figura 20. Caminhão pipa utilizado para o transporte aplicação de água sobre a via, com o intuito de simular a precipitação.....	86
Figura 21. Composição veicular do tipo Bitrem, utilizada para trafegar a via florestal.....	87
Figura 22. Gráfico para Valor Dedução para o defeito Seção transversal (a) e trilhos de roda (b). ....	87
Figura 23. Gráfico para Valor Dedução para o defeito Segregação de Agregados. ....	88
Figura 24. Gráfico para determinação do URCI. ....	89
Figura 25. Limites de consistência para o Solo Padrão (SP) e Solo Jazida (SJ), bem como para as misturas de Solo Padrão + Cimento <i>Portland</i> .....	90
Figura 26. Curva granulométrica referente ao Solo Padrão (SP) e Solo Jazida (SJ).....	92
Figura 27. Curva granulométrica referente ao Cascalho padrão (CP), Cascalho alternativo (CA) e Cascalho Padrão + Pedrisco Basáltico (PB). ....	92
Figura 28. Curva granulométrica referente ao Solo Padrão (SP) com Cascalho Padrão (CP) e Cascalho Alternativo (CA). ....	93
Figura 29. Curva granulométrica referente ao Solo Jazida (SJ) com Cascalho Padrão (CP) e Cascalho Alternativo (CA). ....	93
Figura 30. Parâmetros de umidade ótima e densidade máxima para a mistura química de solo padrão + cimento (a), e para as misturas mecânicas solo padrão + cascalho padrão (b), solo padrão + cascalho alternativo (c), solo jazida + cascalho padrão (d) e solo jazida + cascalho alternativo (e).....	95
Figura 31. Parâmetros de Índice de Suporte Califórnia (ISC), densidade no ISC e expansão para a mistura química de solo padrão + cimento (a), e para as misturas mecânicas solo padrão + cascalho padrão (b), solo padrão + cascalho alternativo (c), solo jazida + cascalho padrão (d) e solo jazida + cascalho alternativo (e). ....	97
Figura 32. Comparativo entre os resultados de URCI, obtidos para cada mistura vs a quantidade de solo movimentada em metros quadrados, bem como a evolução de acordo com o número de passadas. ....	100
Figura 33. Classificações referentes a avaliação URCI, para as nove misturas, em função do número de passadas dos veículos do tipo bitrem.....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Conjunto de Peneiras padronizadas pelo DNIT. ....	29
Tabela 2. Faixas Granulométricas propostas pelo DNIT. ....	29
Tabela 3. Classificação TRB (Transportation Research Board) de Solo .....	36
Tabela 4. Valores médios ( $\pm$ desvio-padrão) das frações minerais constituintes do solo. ....	57
Tabela 5. Análise de variância para as misturas químicas considerando o Limite de Plasticidade (LP) e o Índice de Plasticidade (IP). Análise considerando a transformação da variável IP segundo a função Log y. ....	59
Tabela 6. Teste de comparações múltiplas para as médias por Dunnett para os Limites de Plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) considerando o Solo puro (SP) como tratamento controle vs os demais tratamentos envolvendo Dregs (DG), Grits (GT) e Lama de Cal (LC), nas proporções de 2, 4, 8 e 16% .....	60
Tabela 7. Coeficientes de correlações linear de Spearman, para as variáveis de interesse. ....	65
Tabela 8. Alternativas avaliadas e proporção de mistura das amostras. ....	78
Tabela 9. Classificações dos solos padrão e jazida conforme os critérios descritos em USCS e TRB. ....	90
Tabela 10. Caracterização granulométrica do Solo Padrão (SP) e Solo Jazida (SJ). ....	91
Tabela 11. Coeficiente de Uniformidade (Cu) e Coeficiente de Curvatura (Cc) para Solo Padrão (SP), Solo Jazida (SJ) e suas misturas com os agregados de Cascalho Padrão (CP) e Cascalho Alternativo (CA). ....	94
Tabela 12. Análise de variância para os efeitos de mistura, número de passadas e sua interação, considerando a área de solo movimentada. Análise realizada com a variável transformada pela função log y. ....	100
Tabela 13. Teste de comparações múltiplas de médias de Dunnett para a Área de solo movimentada considerando a Mistura 1 como tratamento controle. ....	101
Tabela 14. Médias e desvio padrão observados para as variáveis trilho de rodas e perda de agregados de acordo com a mistura e número de passadas. ....	102
Tabela 15. Respectivas médias e desvio padrão encontrado para a variável URCI, para as nove misturas avaliadas, para os três números de passadas (60, 150 e 200). ....	103
Tabela 16. Análise de variância para os efeitos de mistura, número de passadas e sua interação, considerando a variável URCI, Análise realizada com a especificação da distribuição lognormal. ....	104



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>23</b>
1.1 HIPÓTESES .....	25
1.2 OBJETIVOS .....	25
<b>1.2.1 Geral .....</b>	<b>25</b>
<b>1.2.2 Específicos .....</b>	<b>25</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>27</b>
2.1 ESTRADAS RURAIS DE USO FLORESTAL.....	27
2.2 PROPRIEDADES DOS SOLOS PARA CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA.....	28
<b>2.2.1 Frações e distribuição granulométrica .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.2 Consistência do solo.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.3 Relação de Massa/Volume do solo .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.4 Compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão .....</b>	<b>32</b>
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS .....	35
2.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	38
<b>2.4.1 Estabilização Mecânica .....</b>	<b>39</b>
<b>2.4.2 Estabilização Química.....</b>	<b>40</b>
2.4.2.1 Estabilizantes comerciais – tradicionais.....	41
2.4.2.1.1 Solo-Cimento .....	41
2.4.2.1.2 Solo-Cal.....	41
2.4.2.2 Estabilizantes não tradicionais - Resíduos industriais.....	42
2.5 AVALIAÇÃO DE TRECHOS EXPERIMENTAIS DE ESTRADA .....	43
<b>2.5.1 Avaliação da superfície do trecho experimental.....</b>	<b>44</b>
<b>3 ESTUDO I - COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS DE SOLO E RESÍDUOS FABRIS DE CELULOSE E PAPEL PARA PAVIMENTAÇÃO DE ESTRADAS FLORESTAIS .....</b>	<b>47</b>
3.1 RESUMO .....	47
3.2 INTRODUÇÃO.....	48
3.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	49
<b>3.3.1 Área de estudo.....</b>	<b>49</b>
<b>3.3.2 Solo e resíduos testados .....</b>	<b>50</b>

3.3.3 Misturas solo-resíduo testadas .....	54
3.3.4 Ensaios laboratoriais e determinações.....	55
3.3.5 Análise dos dados.....	56
3.4 RESULTADOS .....	57
3.4.1 Classificação e granulometria do solo.....	57
3.4.2 Limites de consistência .....	58
3.4.3 Parâmetros da curva de compactação .....	61
3.4.4 Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão ISC.....	63
3.4.5 Correlações entre variáveis.....	64
3.5 DISCUSSÃO .....	66
3.6 CONCLUSÕES .....	69
3.7 REFERÊNCIAS .....	69
<b>4 ESTUDO II. DESEMPENHO DE DIFERENTES ALTERNATIVAS PARA ESTABILIZAÇÃO DE CAMADAS DE PAVIMENTOS DESTINADOS À CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS FLORESTAIS .....</b>	<b>73</b>
4.1 RESUMO .....	73
4.2 INTRODUÇÃO .....	74
4.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	75
4.3.1 Caracterização da área de estudo .....	75
4.3.2 Solos, materiais estabilizantes e alternativas avaliadas .....	76
4.3.3 Ensaios de laboratório e determinações .....	79
4.3.4 Construção e avaliação de trechos experimentais .....	81
4.3.5 Análise dos dados.....	89
4.4 RESULTADOS .....	90
4.4.1 Caracterização dos solos .....	90
4.4.2 Granulometria das frações sólidas.....	91
4.4.3 Ensaio de compactação de <i>Proctor</i> .....	94
4.4.4 Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão.....	96
4.4.5 Desempenho dos trechos experimentais .....	99
4.5 DISCUSSÃO .....	105

4.5 CONCLUSÕES .....	107
4.6 REFERÊNCIAS .....	108
<b>5 CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>113</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>115</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>121</b>
Anexo A. Propriedades químicas dos resíduos Dregs, Grits e Lama de Cal.....	121



## 1 INTRODUÇÃO GERAL

As estradas rurais e florestais, comumente são chamadas de estradas de terra, são do ponto de vista social, uma necessidade básica para promover a uma determinada localidade, o fluxo de bens e serviços; auxiliar e possibilitar o desenvolvimento regional; e permitir uma melhor qualidade de vida à comunidades rurais, proporcionando significativos benefícios econômicos e sociais (BAESSO; GOLÇALVES, 2003).

A estrutura da pista de rolamento das estradas rurais e florestais, geralmente, apresenta três camadas básicas, cujas são o subleito, reforço e revestimento com uma mistura de solo e/ou agregados granulares (BAESSO; GONÇALVES, 2003). Tal estrutura, em geral, tem o objetivo de proporcionar suporte a um baixo volume de tráfego (menos de 400 veículos por dia) e velocidade de transporte inferior aos 80 km/h, não justificando sua pavimentação, seja asfáltica (flexível) ou de concreto (rígido) (VISSER; HUDSON, 1983). Dentro das áreas florestais, a estrutura das estradas varia conforme sua classe de uso (primárias, secundárias ou terciárias<sup>1</sup>) que, por sua vez, depende, principalmente, do volume de madeira que será movimentado pela via, tipo de composição veicular de carga que irá operar e sistema de colheita da madeira<sup>2</sup>.

A trafegabilidade das vias rurais e florestais dependente das condições de solo sob o qual foi construída, do terreno (topografia e relevo), do clima (precipitação), mas, também, do padrão e técnica de construção e manutenção empregados, bem como do tráfego e carga a qual será submetida. Normalmente, as estradas rurais de uso florestal têm a peculiaridade de receber tráfego reduzido, às vezes temporário, porém, com veículos extrapesados, os quais na maioria das vezes ultrapassam as 57 toneladas de peso bruto total combinado (MACHADO et al., 2000).

Entretanto, o aumento e expansão da produção do setor florestal no país, principalmente, das empresas de celulose e papel, tem condicionado o uso cada vez mais comum de veículos com capacidade de transporte cada vez maior, em virtude da necessidade de deslocamento mais

---

<sup>1</sup> Segundo Machado e Malinosvki (1986) e Malinovski e Perdoncini (1990), dentro das áreas florestais, as “estradas primárias” são conhecidas como “estradas de ligações” entre o centro consumidor e a área de produção, devendo possuir melhor qualidade que as outras da região, possibilitando, assim, o tráfego de veículos pesado durante o ano todo. As “estradas secundárias”, por sua vez, são aquelas de menor qualidade, normalmente implantadas nas áreas de produção e com tráfego em um único sentido, devendo dar condições de tráfego para áreas de produção específicas, até se chegar às estradas primárias, podendo ou não possibilitar o tráfego pesado normal em todo o ano. E no caso das “estradas terciárias”, estas não possuem revestimento algum e podem ser encontradas somente nas áreas de produção. Por serem de menor qualidade, normalmente são de uso sazonal, muitas vezes se confundindo com caminhos de máquinas, contudo, possuem movimentação de terra.

<sup>2</sup> De acordo com Malinovski et al. (2014), os sistemas de colheita de madeira podem variar e ser classificados quanto à forma da madeira na etapa de extração florestal, quanto ao grau de mecanização e quanto ao espaço de tempo entre as operações de colheita e transporte da madeira. O objetivo da produção florestal condiciona a definição do tipo de sistema de colheita a empregado.

rápido de matéria prima (madeira) e com menor custo logístico. Tal condição decorre em aumento da demanda por veículos especializados e com flexibilidade de atuação em diversas regiões, condições topográficas e, principalmente, durante os doze meses do ano, independente das condições climáticas (SANT'ANNA, 2006).

Desse modo, as vias florestais têm a particularidade de serem impostas às condições de tráfego que imprimem cargas muito variáveis quanto à magnitude, frequência e duração. Estas cargas levam ao surgimento de diferentes níveis de tensões, as quais se distribuem ao longo da estrutura da rodovia e, associados aos efeitos do clima, causam deformações que culminam em defeitos afetando, assim, as condições de trafegabilidade (CARVALHO, 1997).

Outro fator agravante encontrado nas estradas florestais, é o baixo padrão construtivo devido à falta de conhecimento de técnicas de estabilização e o emprego de materiais que não atendem as exigências do projeto, como solos extremamente expansivos devido ao elevado teor de silte, matéria orgânica e argilas reativas (REZENDE, 1999). Por isso, fica evidente a importância da definição de padrões construtivos que garantam a trafegabilidade das vias com o propósito que o transporte possa ser executado sem interrupções, com segurança e, principalmente, atendendo as demandas de produção.

Dessa forma, para atingir tal propósito é necessário se realizar estudos geotécnicos para identificar e classificar os solos (COZZOLINO; NOGAMI, 1993) com vistas à empregar este como um material apto para a construção, antevendo o seu comportamento mecânico e possibilitando o uso de técnicas racionais para a construção de camadas do pavimento rodoviário (MACHADO et al, 2013). Também, em estudos geotécnicos é fundamental que sejam avaliados materiais alternativos disponíveis para aplicação na construção do pavimento, sejam estes de atuação para estabilização química e/ou mecânica (RANGEL, 1980).

Visando alcançar tais proposições, a presente pesquisa foi dividida em dois estudos, sendo o objetivo do primeiro estudo versado na determinação do comportamento mecânico de misturas de solo e resíduos fabris de celulose e papel para estradas florestais, no qual foi avaliada a potencial aplicação de três resíduos fabris (*Dregs*, *Grits* e Lama de Cal), como efeito de melhoria na estabilização do solo. O segundo estudo foi desenvolvido com o intuito de avaliar a estabilização química do solo por meio de solo-cimento e a estabilização mecânica por meio de mistura de proporções de dois tipos de solo e dois tipos de agregado basáltico. Além disso, também, avaliou-se diferentes técnicas de construção por meio de trechos experimentais, com o intuito de avaliar o comportamento destes em diferentes solicitações de tráfego de veículos de transporte, com eixo padrão de 8,2 toneladas.

## 1.1 HIPÓTESES

Os estabilizantes químicos atuam na impermeabilização, dispersão e floculação do solo. Dessa forma, o uso de resíduos da fabricação de celulose e papel como estabilizantes tem o potencial de reduzir a plasticidade do solo, aumentando sua resistência e capacidade de suporte ao tráfego. Entretanto, o efeito é dependente do tipo e proporção de resíduo empregado.

O emprego de materiais basálticos para a estabilização mecânica do solo age diretamente na estrutura física deste, uniformizando sua granulometria, diminuindo os espaços vazios, aumentando sua resistência à esforços e tensões e, conseqüentemente, melhorando sua trafegabilidade. Em semelhança, tal efeito também ocorre com o emprego de cimento como estabilizante, embora este haja quimicamente com o solo. Porém, o processo de melhoria da trafegabilidade é dependente do tipo de material e proporção empregada.

Solos que foram estabilizados, seja química ou mecanicamente, apresentam maior resistência mecânica e, conseqüentemente, menor deformabilidade e defeitos com a ação do tráfego de veículos de transporte. Porém, a deformação depende da composição estrutural das camadas do pavimento, do método de estabilização utilizado e da intensidade de tráfego imposta.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Geral

Avaliar alternativas para estabilização química e mecânica de dois tipos de solo para construção de camadas de pavimento, visando subsidiar o planejamento das operações e melhorar a trafegabilidade de estradas florestais.

### 1.2.2 Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Avaliar propriedades e parâmetros mecânicos de solos e de misturas de solo com agentes químicos e rochosos com vistas a aplicação para a construção de camadas de pavimento de estradas florestais;
- b) Verificar a relação entre o comportamento mecânico de solos e diferentes tipos e quantidades de materiais estabilizantes, em nível estatístico e nível de campo;

- c) Avaliar o desempenho de trechos experimentais construídos com diferentes combinações de camadas e de materiais estabilizantes químicos e/ou mecânicos, submetidos a diferentes níveis de tráfego de veículos de transporte.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 ESTRADAS RURAIS DE USO FLORESTAL

As estradas são importantes propulsoras no desenvolvimento econômico e social de um país. No Brasil, o transporte rodoviário constitui a principal via de integração, sendo fundamental para o escoamento de produtos industriais e agrícolas (TRINDADE et al., 2005). No país, segundo Boletim Estatístico da Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2018), 61,1% do transporte de cargas é efetuado pelo sistema rodoviário. Atualmente, a malha rodoviária brasileira é composta por cerca de 1.735.411 km, sendo que destes, cerca de 1.364.511 km (78%) são compostos de estradas não pavimentadas, e são uma minoria aquelas com planejamento e pavimentação efetiva (CNT, 2018).

No caso do segmento florestal, as estradas permitem o acesso às áreas de floresta, viabilizando as atividades de silvicultura, possibilitando a chegada de insumos e mão de obra até o povoamento, permitindo a realização e acompanhamento do manejo ao longo de todo o ciclo da floresta, a proteção florestal e, fundamentalmente, a colheita e o transporte florestal, reduzindo as distâncias de extração, facilitando e orientando para o planejamento florestal (MACHADO et al, 2013).

Ainda que com aumentos expressivos, a concepção do uso das estradas para fins florestais até os dias atuais, tem sido realizada sob baixo padrão construtivo, limitando o tráfego durante determinadas épocas do ano (MACHADO et al., 1991). Segundo Machado, Silva e Portugal (2013), os maiores problemas que são constatados na construção de estradas florestais são: *i*) baixa durabilidade da superfície de rolamento e *ii*) limitada disponibilidade de solos locais aptos para uso como revestimento primário.

Neste sentido torna-se necessário desenvolver projetos construtivos, que designem as operações de construção e manutenção das estradas. Este projeto deve otimizar a geometria da estrada em função das características físicas dos veículos de transporte, em especial a largura e comprimento da composição veicular de cargas. Além disso, são necessários estudos de tráfego, topográficos, geológicos, geotécnicos e hidrológicos para o desenvolvimento por completo do projeto de pavimentação e de drenagem da rede viária (MACHADO et al, 2013).

## 2.2 PROPRIEDADES DOS SOLOS PARA CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA

### 2.2.1 Frações e distribuição granulométrica

As frações constituintes do solo recebem designações próprias segundo as dimensões das suas partículas e dentro de determinados limites convencionais. Essas frações podem explicar a primeira característica que pode diferenciar um solo, ou seja, por meio do tamanho de suas partículas. A diversidade do tamanho dos grãos é enorme, pois existem grãos de “pedregulho” com dimensões entre 4,8 mm e 7,6 cm (porção grosseira do solo), já as demais frações que geralmente iniciam-se com a areia grossa nas dimensões de 2 a 4,8 mm, podendo chegar a menor fração do solo, que são as partículas de argila inferiores a 0,005 mm, mas que podem chegar a 10 angstroms (0,000001 mm), estes sendo chamados de solos finos (PINTO, 2006).

A distribuição do tamanho de partículas pode ser obtida e quantificada pela análise granulométrica, que consiste basicamente, em passar o solo sobre um jogo de peneiras padronizadas (Tabela 1). Com este processo obtêm-se as porcentagens das diferentes frações grosseiras constituintes do solo ( $>0,074$  mm). Para a determinação das partículas finas (silte e argila) com diâmetros inferiores a 0,074 mm, baseia-se na lei de sedimentação de Stokes, a qual estabelece uma relação entre o diâmetro das partículas e a sua velocidade de sedimentação em meio líquido de viscosidade e densidades conhecidas (PEREIRA, 2005).

Solos com granulometria mal graduada tendem a apresentar comportamento mecânico mais instável devido ter maior índice de vazios do que solos bem graduados. Assim, para facilitar o estudo de solos para emprego na construção de pavimentos de estradas, o DNIT sugere adotar o seguinte conjunto de peneiras padronizadas (PEREIRA, 2005).

Tabela 1. Conjunto de Peneiras padronizadas pelo DNIT.

<b>Peneira #</b>	<b>Abertura Nominal (mm)</b>	<b>Peneira #</b>	<b>Abertura Nominal (mm)</b>
2"	50,8	Nº10	2
1 1/2"	38,1	Nº16	1,2
1"	25,4	Nº30	0,6
3/4"	19,1	Nº40	0,42
1/2"	12,7	Nº50	0,3
3/8"	9,5	Nº100	0,15
Nº4	4,8	Nº200	0,074

Fonte: DNIT, 2006.

Os solos podem revelar diferentes padrões de granulometria (uniformes, bem graduadas e mal graduadas). Para fins rodoviários, na maioria das vezes são estabelecidas faixas granulométricas (Tabela 2), sendo que as curvas granulométricas dos solos devem se enquadrar em determinadas faixas, dependendo da sua finalidade construtiva (DNIT, 1996).

Tabela 2. Faixas Granulométricas propostas pelo DNIT.

<b>Tipos</b>	<b>Para N &gt; 5x10<sup>6</sup></b>			<b>Para N &lt; 5x10<sup>6</sup></b>			<b>Tolerância da faixa de projeto</b>
	<b>Faixas</b>	<b>Faixa A</b>	<b>Faixa B</b>	<b>Faixa C</b>	<b>Faixa D</b>	<b>Faixa E</b>	
Peneiras				% em peso Passante			
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
Nº4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
Nº10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
Nº40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
Nº200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

Fonte: DNIT, 1996.

As denominações utilizadas para expressar as frações granulométricas de um solo são empregadas para caracterizar os próprios solos. Por exemplo, solos chamados “argila” revelam comportamento de solo argiloso. Assim como, solos “areia” tem seu comportamento determinado predominante pelos grãos arenosos. Ainda que, ambos os tipos de solos contenham outras partículas. Existem também, os solos que contem “minerais-argila”, cujas dimensões de

partículas são bastante reduzidas, estes conferem a plasticidade característica aos solos argilosos (PINTO, 2006).

### 2.2.2 Consistência do solo

Posteriormente temos a propriedade de consistência do solo, também conhecidos como limites de *Atterberg*, este é frequentemente usada para descrever a condição de consistência do solo. Na prática, é usado apenas em referência para a condição dos solos finos, esses que são acentuadamente afetados pelas mudanças na umidade. A condição dos solos grosseiros é geralmente descrita em termos de densidade (HOUGH, 1969).

O ensaio foi desenvolvido pelo engenheiro químico Albert Atterberg, os índices de consistência receberam adaptações e foram padronizados pelo professor de Mecânica dos Solos, Arthur Casagrande, no ano de 1948 (PINTO, 2006). Este autor, desenvolveu o Gráfico de Plasticidade, onde o solo é identificado por um sistema de coordenadas que possui o limite de liquidez no eixo das abcissas e o índice de plasticidade no eixo das ordenadas. Os estados de consistência dos solos referem-se à umidade limite que o solo possui para se enquadrar no estado sólido, semi-sólido, plástico ou líquido. A umidade correspondente às mudanças de estado é denominada:

a) Limite de Liquidez (LL): é definido como a umidade do solo com a qual uma ranhura nele feita requer 25 golpes para se fechar, delimitando a fronteira entre o estado líquido e plástico. Para determinar o LL coloca-se no equipamento de Casagrande uma massa de solo que passa na peneira de Nº 40 (abertura nominal de 0,42 mm), homogeneizada com adição de água. Posterior realiza-se uma ranhura no meio da massa de solo com o auxílio de um cinzel, em sequência aplicam-se golpes na concha onde o solo está armazenado, até que as duas partes de solo se unam na ranhura por pelo menos 1 cm de comprimento, repete-se o teste em diversas umidades, em seguida pode-se plotar um gráfico entre o número de golpes e a umidade, logo o LL é definido como sendo a umidade correspondente a 25 golpes (PINTO, 2006).

b) Limite de Plasticidade (LP): delimita o estado plástico do semi-sólido. O LP será determinado em laboratório com a mesma porção de solo que passa na peneira de Nº 40 que foi homogeneizada com a adição de água para a determinação do LL. Com essa massa de solo, realiza-se com o auxílio da palma das mãos e de uma placa de vidro esmerilhada, de modo a formar um cilindro de 3 mm de diâmetro, e quando o cilindro ao ser enrolado, se rompe, determina-se a umidade desse ponto. Para determinar a umidade, utiliza-se uma estufa a 105 – 110°C. Repete-se o ensaio até obter três valores que não difiram da média em mais de 5%.

c) Limite de Contração (LC): delimita o estado semi-sólido do sólido. Entretanto, se tratando de estradas é comum utilizar apenas os índices LL e LP, cuja diferença fornece o parâmetro denominado índice de plasticidade (IP).

Uma das formas de avaliar a variação do volume dos solos compactados (contração ou expansão) é por intermédio do LL e LP. A contração ou expansão são características indesejáveis para a construção rodoviária. Por isso, alguns métodos de dimensionamento de pavimentos limitam os valores para esses índices como o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis (DNIT, 1996). Neste método, os valores máximos de aceitação para LL e IP são 25% e 6%, respectivamente, considerando materiais para base de pavimentos (PEREIRA, 2005).

As propriedades dos solos argilosos, como coesão e compressibilidade, dependem de sua consistência natural (ROSENAK, 1963). Alguns solos, ao serem trabalhados, alterando-se a umidade, atingem um estado de consistência denominado estado plástico. Estes solos são as argilas. As características plásticas e de compressibilidade dos solos é ditada pela forma das partículas, que dependem da estrutura de cada argilo-mineral presente no solo. As propriedades plásticas dependem diretamente da quantidade de água presente no solo (BUENO; VILAR, 1980).

A plasticidade reflete a maior ou menor capacidade que o solo possui de ser moldado, sob determinada condição de umidade, sem variação de volume, tratando-se, de uma das mais importantes propriedades principalmente das argilas. Quanto maior o conteúdo de água em solos que possuem que possuem mais de 15% de argila, o comportamento dos mesmos corresponde aos estados sólido, semi-sólido, plástico e líquido (RENEDO, 1996).

### **2.2.3 Relação de Massa/Volume do solo**

O solo é constituído por um conjunto de partículas sólidas, deixando entre si vazios que poderão estar parcial ou totalmente preenchidas com água, definindo as três fases do solo: sólida, líquida e gasosa, sendo estas de extrema importância, pois estão intimamente ligadas com a relação massa e volume do solo (CAPUTO, 1988).

O comportamento de um solo depende da quantidade relativa de cada uma das três fases. Diversas relações podem ser empregadas para expressar as porções entre elas. Em princípio, as quantidades de água e ar podem variar, principalmente devido a evaporação da água, que automaticamente estará substituindo a água pelo ar, e a compensação do solo pode provocar a

saída de água e ar, reduzindo o volume de vazios. Quando diminui o estado de vazios por exemplo a resistência do solo aumenta (PINTO, 2006).

A umidade de um solo, pode ser definida sendo a razão entre o peso da água contida num certo volume de solo e o peso da parte sólida existente nesse mesmo volume. Geralmente situam-se entre os valores de 10 e 40%, podendo ocorrer valores muito baixos (solos secos) e muito altos (150% ou mais). Já os índices de vazios, podem ser definidos como sendo a relação entre o volume de vazios e o volume das partículas sólidas. Costuma se situar entre 0,5 e 1,5, mas argilas orgânicas podem apresentar índices de vazios superiores a 3 (volume de vazios, no caso com água, superior a 3 vezes o volume de partículas sólidas) (PINTO, 2006).

Outro índice importante é a densidade da fase sólida, também chamada de peso específico dos sólidos ou grãos. Relação entre o peso das partículas sólidas e o seu volume, geralmente varia pouco de solo em solo. Valores comumente encontrados para o quartzo (areia)  $2,70 \text{ g/cm}^3$ , já as argilas lateríticas, devido a deposição de sais de ferro, podem apresentar valores de até  $3,0 \text{ g/cm}^3$ . Porém, estes índices não podem ser confundidos com o peso específico aparente seco, que representa a mesma relação, porém, se o solo viesse a ficar seco, e isso pudesse ocorrer sem que houvesse alteração no volume. Situa-se na casa entre  $1,33$  a  $1,94 \text{ g/cm}^3$  ( $0,51$  a  $0,71 \text{ g/cm}^3$  no caso das argilas orgânicas moles) (PINTO, 2006).

#### **2.2.4 Compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão**

A compactação de um solo nada mais é do que a sua densificação por meio de um esforço mecânico. Este tratamento mecânico que pode ser aplicado ao solo com o objetivo de reduzir o seu índice de espaços vazios, por meio da aplicação de cargas repetitivas que, em maior ou menor grau, reorientam as partículas do solo, aumentando sua resistência (PINTO, 2006; REICHERT et al., 2010; MACHADO et al, 2013).

A compactação tem em vista dois objetivos, que é de aumentar a intimidade de contato entre os grãos e tornar este mais homogêneo (PINTO, 2006). Nesse processo a água tem papel fundamental, pois quando se compacta um solo com baixa umidade, o atrito entre as partículas do solo é muito alto, e isso não permite atingir uma redução significativa nos espaços vazios. Para umidade muito elevadas a água exerce um papel de lubrificante entre as partículas do solo, permitindo que as mesmas deslizem entre si, acomodando-se num arranjo mais compacto (PINTO, 2006; KORMANN, 1997).

Em estradas, a compactação se insere como umas das possíveis técnicas de estabilização mecânica de solos, comumente utilizada na execução de camadas constitutivas de pavimentos

rodoviários onde se utiliza o solo como material de construção, com o intuito, de se alcançar a máxima estabilidade e mitigar possíveis recalques ocasionados pela ação do tráfego (DNIT, 2006).

Pressupõe-se que o aumento da densidade proporciona um aumento da resistência. Proctor em 1933 demonstrou que os solos apresentam uma relação entre seu teor de umidade e a sua densidade, traduzindo em uma curva de compactação, curva esta que permite a identificação dos parâmetros ótimos de compactação, sendo estes denominados de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima (DNIT, 2006).

A eficiência da compactação depende de diversos fatores, dentre eles pode-se destacar: i) a classe de solo em que está se trabalhando; ii) a energia de compactação que pretende-se utilizar; iii) o tipo de compactação; iv) a capacidade que o solo apresenta de absorver água e v) o conteúdo de água existente no solo (DNIT, 1996).

De maneira geral, os solos argilosos apresentam densidades secas baixas, e umidades ótimas elevadas. Em argilas valores de umidade ótima na casa entre 25 e 30% são comuns e correspondem a densidades secas máximas de 1,5 a 1,4 g/cm<sup>3</sup>. Já os solos siltosos tendem a apresentar valores de densidade seca máxima baixas e curvas bem abatidas, diferentemente de areais e pedregulhos que geralmente apresentam densidades secas máximas na ordem de 2,0 a 2,1 g/cm<sup>3</sup> e umidade ótima na ordem de 9 a 10% (PINTO, 2006). Vale ressaltar que estes valores tem relação com a energia de compactação aplicada, sendo que esta pode ser chamada de normal, intermediária e modificada.

A estrutura do solo quando compactado pode apresentar características peculiares. Pois quando compactado com baixa umidade, a atração face-aresta das partículas não é vencida pela energia de aplicada e o solo acaba ficando com uma estrutura chamada de floclada. Já para umidades maiores a repulsão entre as partículas aumenta, e a compactação acaba as orientando e posicionando-as paralelamente, ficando com uma estrutura dita dispersa (PINTO, 2006).

Quanto ao Índice de Suporte Califórnia - ISC, trata-se de um ensaio de penetração desenvolvido nos Estados Unidos, pelo Departamento de Rodovias do Estado da Califórnia (*California State Highway Department*), e adotado pelo *Corps of Enginners* no ano de 1943. Tem como objetivo avaliar a resistência mecânica de materiais granulares e solos finos, medindo-se a carga necessária aplicada para que um pistão com dimensões padronizadas possa penetrar em um corpo de prova, que encontra-se em condições de compactação, baseado em normas e procedimentos (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

Segundo DNER – ME 049/94 (DNER, 1994), no ensaio de CBR mede-se as cargas necessárias para um pistão com área de 19,35 cm<sup>2</sup> penetrar em um corpo-de-prova com

velocidade de 0,127 cm/minuto. Registrando-se as pressões necessárias para penetrações nos seguintes valores: 0,75 mm, 1,25 mm, 2,54 mm, 5,08 mm, 7,5 mm, 10,0 mm e 12,5 mm. Adotando-se para a determinação do CBR, os valores referentes aos pontos de 2,54 mm (0,1”) e 5,08 mm (0,2”). Este teste é realizado após os corpos de prova estarem sob imersão em água por um período de 96 horas (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

Para este ensaio utiliza-se cilindros Califórnia, com diâmetro de 15,1 cm e altura de 17,9 cm. Compacta-se o solo em cinco camadas, com soquete de 4,5 kg, sendo este liberado em queda livre a uma altura de 45 cm, podendo ser adotadas três diferentes esforços de compactação, como Normal (6 kg/cm<sup>2</sup>), Intermediária (13 kg/cm<sup>2</sup>) e Modificada (27 kg/cm<sup>2</sup>), sendo o número de golpes de 12, 26 e 55 respectivamente.

O ISC é a relação entre a pressão equivalente a uma determinada penetração do pistão no solo compactado a uma mesma pressão obtida numa brita graduada de alta resistência, que é adotada como referência, sendo seu valor expresso em porcentagem (PEREIRA, 2005).

Este ensaio pode ser determinado apenas para um ponto, onde a compactação é realizada na umidade ótima do solo, sendo esse procedimento utilizado para caracterização do subleito. Para se identificar uma variação em relação ao teor de umidade executa-se o ICS para cinco pontos, amplamente utilizado para caracterização de jazidas de empréstimos, mas também pode ser aplicado para o subleito (PEREIRA, 2005).

A expansão pode ser entendida como sendo o ganho de volume do solo quando esse absorve água. A determinação da expansão dos solos pode ser realizada por diversos procedimentos, sendo usual, para fins rodoviários, o uso do ensaio CBR. Durante o período de imersão dos corpos de prova durante as 96 horas, mede-se a expansão do mesmo colocando-se um extensômetro que permanece apoiado sobre um suporte, nos bordos do cilindro por uma haste, se move quando o corpo-de-prova se expande, apresentando aumentos de altura (PEREIRA, 2005).

A expansão nada mais é que uma relação, em %, entre o aumento de altura do corpo de prova e a altura inicial do mesmo. O DNER (1996) apresenta as seguintes especificações para valores máximos admissíveis, para o índice expansão, medido via ensaio CBR, em camadas de pavimentos rodoviários dimensionadas pelo seu método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: (i) materiais para subleito, com expansão  $\leq 2$  %; (ii) materiais para reforço do subleito, com expansão  $\leq 1$  %; (iii) materiais para sub-base, com expansão  $\leq 1$  %; (iv) materiais para base, com expansão  $\leq 0,5$  % (PEREIRA, 2005).

## 2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

A diversidade e a enorme diferença de comportamento apresentado pelos solos perante as solicitações de interesse da engenharia levou ao seu natural agrupamento em conjuntos, com certas propriedades, e com isso surgiram as classificações dos solos (PINTO, 2006). Do ponto de vista construtivo, solos diferentes, mas com propriedades similares podem ser enquadrados em grupos ou subgrupos de acordo com seus respectivos comportamento (DAS, 2007).

O objetivo da classificação dos solos, no enfoque da engenharia, é o de poder estimar o provável comportamento do solo ou orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um determinado problema (PINTO, 2006).

Atualmente, dentre os sistemas de classificação de solos, podemos destacar os sistemas *Transportation Research Board* (TRB) e o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) como sendo os principais (BUENO; VILAR, 1980). Estes dois sistemas baseiam-se na classificação dos solos conforme a composição granulométrica e consistência.

Já a classificação geotécnica de solos TRB (*Transportation Research Board*, baseia-se na granulometria do solo, em porcentagens que passam nas peneiras Nº 10, Nº 40 e Nº 200. Também são considerados os limites de consistência (limite de liquidez - LL e índice de plasticidade - IP). Dessa forma, é possível separar os solos em dois grandes grupos, os materiais siltosos e argilosos, apresentando comportamento de fraco a bom, e os materiais granulares (areias, pedra britada e pedregulho) com comportamento de bom a excelente, como materiais de subleito de estradas (DNIT, 2006).

Após obtenção dos resultados de granulometria e limites de consistência, procede-se o cálculo do Índice de grupos (IG), conforme a Equação 1.

$$IG = (F_{200} - 35) [0,2 + 0,005 (LL - 40)] + 0,01(F_{200} - 15) (IP - 10) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

F<sub>200</sub> = % que passa na peneira nº 200; LL = limite de liquidez; IP = Índice de plasticidade

Após a determinação das frações granulométricas, dos limites de consistência e cálculo do índice de grupo (IG), foi possível determinar a classificação dos solos pelo sistema rodoviário TRB (*Transportation Research Board*), seguindo a metodologia proposta na Tabela 3.

Tabela 3. Classificação TRB (*Transportation Research Board*) de Solo

Determinação do Grupo TRB											
Classificação Geral	Solos Granulares (P200<35%)		Solos Silto-argilosos (P200>35%)								
Grupos	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7
Subgrupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
% passa Peneira N° 10	< 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
% passa Peneira N° 40	< 30	< 50	> 50	-	-	-	-	-	-	-	-
% passa Peneira N° 200	< 15	< 25	< 10	< 35	< 35	< 35	< 35	> 35	> 35	> 35	> 35
LL	-	-	-	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40
IP	< 6	< 6	NP	< 10	< 10	> 10	> 10	< 10	< 10	> 10	> 10*
IG	0	0	0	0	0	< 4	< 4	< 8	< 12	< 16	< 20
Tipos de Material	Fragmentos de pedra, pedregulho e areia		Areia Fina	Pedregulhos e areias siltosas ou argilosas				Solos siltosos		Solos Argilosos	
Classificação como subleito	Excelente a bom							Regular a mau			

\* O IP do grupo A – 7 – 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Já o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) leva em consideração os mesmos índices classificatórios do sistema TRB. Fundamenta-se na caracterização táctil visual, na textura, considerando as frações granulométricas e os coeficientes de uniformidades (Cu) e de curvatura (Cc) da curva granulométrica, e nos limites de Atterberg através da carta de plasticidade proposta por Casagrande. Este sistema, divide os solos em 14 grupos representados por duas letras, sendo a primeira relativa à granulometria e a segunda à plasticidade (PEREIRA, 2005).

Nesta classificação todos os solos são identificados com um conjunto de duas letras conforme ilustrado na Figura 1. Para a classificação por este sistema a primeira informação a considerar-se é a porcentagem de finos que o solo apresenta, considerando como finos o material inferior a 0,075 mm, Se essa porcentagem for inferior a 50, o solo será considerado como solo de granulação grosseira, e se for superior será considerado de granulação fina (PINTO, 2006).

Figura 1. Sistema unificado de Classificação de solos

Processo para identificação no campo				Grupo	Designação característica	
SOLOS DE GRANULAÇÃO GROSSA Mais de metade é maior que a abertura da peneira de malha n.º 40	PEDREGULHOS Mais de metade da fração grossa e maior que a # n.º 10	PEDREGULHOS Puros (pouco ou nenhum fino)	Grãos cobrindo toda a escala de granulação com quantidade substancial de todas as partículas intermediárias	<b>GW</b>	Pedregulhos bem graduados, misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino.	
			Predominância de um tamanho de grão ou graduação falhada (ausência de alguns tamanhos de grão)	<b>GP</b>	Pedregulhos mal graduados, misturas de pedregulho e areia com pouco ou nenhum fino.	
		PDREGULHOS COM FINOS (apreciável quantidade de finos)	Finos não plásticos (ML ou MH).	<b>GF</b>	Pedregulhos siltosos, misturas de pedregulho, areia e silte mal graduados.	
			Finos plásticos (CL ou CH)	<b>GC</b>	Pedregulhos argilosos, misturas de pedregulho, areia e argila bem graduados.	
	AREIAS Mais de metade da fração grossa menor que a # n.º 10	AREIAS PURAS (pouco ou nenhum fino)	Grãos cobrindo toda a escala de granulação com quantidade substancial de todas as partículas intermediárias	<b>SW</b>	Areias bem graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.	
			Predominância de um grão ou graduação falhada	<b>SP</b>	Areias mal graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.	
		AREIA COM FINOS (apreciável quantidade de finos)	Finos não plásticos (ML ou MH)	<b>SF</b>	Areias siltosas, misturas mal graduadas de areia e silte.	
			Finos plásticos (CL ou CH ou OH)	<b>SC</b>	Areias argilosas, misturas bem graduadas de areia e argila.	
SOLOS DE GRANULAÇÃO FINA Mais que a metade do material é menor que a abertura de malha da # 200	Processo de identificação executado sobre a fração < # n.º 40			A abertura da malha # n.º 200 corresponde aproximadamente à menor partícula visível a olho nu		
	ENSAIO EXPEDITO →	RESISTENCIA a SECO (esmagamento pelos dedos)	DILATÂNCIA (DILAÇÃO)			RIGIDEZ (consistência na proximidade do LP)
	SILTES E ARGILAS Limite de Liquidez menor que 50	nenhuma a pequena	rápida a lenta	nenhuma	<b>ML</b>	Siltes inorgânicos e areias muito finas, alteração de rocha, areias finas, siltosas ou argilosas com pequena plasticidade.
		média a elevada	Nenhuma a muito lenta	média	<b>CL</b>	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras.
		Pequena à média	lenta	pequena	<b>OL</b>	Siltes orgânicos e siltes argilosos orgânicos de baixa plasticidade
	SILTES E ARGILAS Limite de liquidez maior que 50	Pequena a média	Lenta a nenhuma	Pequena a média	<b>MH</b>	Siltes inorgânicos, micáceos ou diatomáceos, finos arenosos ou solos siltosos, siltes elásticos.
		Elevada a muito elevada	nenhuma	elevada	<b>CH</b>	Argilas inorgânicas de alta plasticidade, argilas gordas.
		Média a elevada	Nenhuma a muito lenta	Pequena a média	<b>OH</b>	Argilas orgânicas de média e alta plasticidade
	TURFAS	Facilmente identificáveis pela cor, cheiro, porosidade e freqüentemente pela textura fibrosa.			<b>Pt</b>	Solos com elevado teor de matéria orgânica

Fonte: DNIT, 2006.

Os solos de granulação grossa, poderão ser classificados como pedregulho ou areia, a depender de qual fração vai predominar. O próximo passo é conhecer a característica secundária do solo, verificando como é a sua composição granulométrica, permitindo determinar se os solos são “bem graduados”, ou “mal graduados” (PINTO, 2006).

A expressão “bem graduados” apresenta o fato de o que a existência de grãos com diversos diâmetros confere ao solo de maneira geral melhor comportamento sob o ponto de vista de engenharia. Uma vez que partículas menores ocupam os espaços vazios, criando um entrosamento, do qual resulta menor compressibilidade e maior resistência (PINTO, 2006).

Quando a fração fina for a predominante o solos será classificado como silte, argila ou solo orgânico. Não apenas em função dos percentuais das frações silte e argila, mas também de seus índices de consistência que melhor indicam o comportamento argiloso. Quanto aos solos orgânicos estes, são aqueles que possuem quantidades significativas de matéria orgânica (de 4 a 20% de seu peso). Visivelmente estes solos são fáceis de serem identificados devido a coloração escura e pelo odor característico (PINTO, 2006).

## 2.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Diferentemente de outras vias de tráfego, as estradas florestais requerem condições de suporte, pois trafegam veículos com grande capacidade de carga, podendo ultrapassar as 57 toneladas de peso bruto total combinado, a depender do tipo de composição de carga que está sendo utilizada. Entretanto, nem todas as estradas fornecem boas condições para que esse tipo de veículo trafegue. Em inúmeras situações, o solo no qual se pretende iniciar o tráfego florestal não apresenta condições requeridas para a obra, como resistência, compressibilidade e entre outros (TRINDADE et al., 2008).

Para possibilitar o uso de alguns tipos de solos como base de uma estrada ele deve ser estabilizado, de modo que o solo possa suportar o tráfego, mesmo em condições desfavoráveis de umedecimento e secagem (EMMERT, 2010).

Os processos de estabilização de solo consistem em qualquer modificação artificial inserida em seu comportamento permitindo o emprego de obras de engenharia (LIMA, 1981). Referem-se a métodos de construção nos quais os solos são tratados de modo a adquirir camadas (subleitos, leitos, sub-bases e bases e ocasionalmente revestimentos). Estas camadas depois de estabilizadas permitem suportar as cargas do tráfego, resistindo a desgastes e as intempéries sem degradação das mesmas (BAPTISTA, 1978). Nem todas as estradas necessitam de estabilização, seja ela mecânica, química, térmica ou elétrica, mas toda a estrada florestal geralmente possui trechos que deveriam ter sofrido algum tipo de tratamento estabilizante (EMMERT, 2010).

Conceitualmente a estabilização de solos é representada por qualquer modificação artificial com a finalidade de possibilitar a sua utilização em uso de pavimentos rodoviários, devido a melhorias na resistência ao cisalhamento, deformação quando recebe esforço de cargas, absorção de umidade, entre outros. Quando se tenta ordenar as diferentes técnicas de estabilização dos solos, é possível observar as semelhanças nos meios e mecanismos utilizados (MACHADO et al, 2013).

Estes mesmos destacam a estabilização mecânica, química, elétrica e térmica como sendo as principais modalidades.

#### **2.4.1 Estabilização Mecânica**

Este método consiste basicamente em introduzir melhorias no sistema trifásico do solo, restringindo-se, basicamente, as dois métodos não excludentes um ao outro (MACHADO et al, 2013; KEZDI; TETHATI, 1988).

O primeiro método é estabilização por rearranjo das partículas via a compactação, cujo processo consiste em execução de uma ação mecânica imposta ao solo sob compressão, provocando assim a redução do seu índice de vazios, decorrente da expulsão de ar (TRINDADE, 2008). Durante este processo, aumenta-se a densidade do solo pelo acúmulo de partículas, reduzindo o volume de ar, mantendo o volume de água inalterado (CRAIG, 1980).

O mentor do processo de controle de compactação foi Ralph *Proctor*. Este engenheiro publicou suas observações sobre a compactação de aterros, mostrando ser a compactação função de quatro variáveis: *i*) Peso específico seco, *ii*) Umidade, *iii*) Energia de compactação e *iv*) Tipo de solo.

O segundo método de estabilização mecânica é por adição ou remoção de partículas visando a correção granulométrica do solo. Este método consiste no emprego de um material ou na mistura de dois ou mais materiais que se enquadrem dentro de determinada especificação (BAPTISTA, 1978). Quando ocorre um processo de estabilização granulométrica, a mistura de solos passará a apresentar três constituintes principais: *i*) um agregado grosseiro bem graduado; *ii*) um agregado fino e *iii*) aglutinante de argila (FORBES, 1955).

Do ponto de vista rodoviário, a estabilização granulométrica consiste na deposição de camadas por compactação de um material ou mistura de matérias que apresentem padrões granulométricos apropriados e índices geotécnicos específicos (DNIT, 2006). Os materiais naturais, por exemplo, sofrem um beneficiamento prévio afim de alcançar o enquadramento nas especificações.

De forma similar a estabilização mecânica por compactação (que visa aumentar a densidade do solo), a estabilização mecânica granulométrica consiste em corrigir a granulometria e plasticidade, por processos de composição artificial do solo, conferindo-lhe uma proporção adequada das frações do solo (VARGAS, 1977).

### 2.4.2 Estabilização Química

A estabilização química é realizada a partir da inserção de aditivos e/ou materiais cimentantes ou químicos ao solo, com potencial de conferir ao solo propriedades pré-determinadas, podendo a estabilização ser processada por quatro diferentes vias (MACHADO et al, 2013). *a)* Substituição das moléculas de água e cátions adsorvidos por cátions hidro-repelentes; *b)* Estabelecimento de ligações reforçadas entre agregados de partículas pela adição de ligantes; *c)* floculação; *d)* dispersão. Vogt (1967 apud BALBO, 1996) definiu a técnica de estabilização química de um solo, como sendo a modificação de suas propriedades geotécnicas pela adição de outro material que deve ser intimamente incorporado ao mesmo com subsequente compactação da mistura.

Partículas hidro-repelentes ou Impermeabilizantes: ocupação dos espaços vazios presentes na massa do solo, pela criação de uma partícula hidro-repelente que impede que a água penetre nelas (LAMBE; MICHAELS, 1954);

Dispersão: aumento da força de repulsão Inter partículas do solo, devido ao aumento de cargas eletronegativas ou espessura da membrana de água que envolve as partículas do solo (LAMBE; MICHAELS, 1954);

Floculação: criação de coesão Inter partículas, dando origem a flóculos e criando ligações reforçadas entre os agregados de partículas menores, criando agregados maiores. Os agentes floculantes, criam uma ligação química e/ou física entre as partículas do solo, auxiliando no aumento da atração entre as partículas, tornando os grãos maiores e mais resistentes quando submetidos a esforços (BRAZETTI, 1996)

Os dispersantes podem incrementar a repulsão elétrica entre as partículas de solos argilosos, dispersando-as e desmontando os grumos argilosos que resistem ao esforço de compactação. Isto possibilita o processo de compactação, e formação de uma massa de solo de alta densidade, o que gera um aumento da resistência e um decréscimo da permeabilidade, tornando o solo mais estável (LAMBE; MICHAELS, 1954).

De maneira geral, devido ao modo de atuação sobre características superficiais das partículas do solo, os agentes de estabilização química revelam maior eficiência sobre solos finos ou com alta superfície específica. Existe uma gama de produtos que podem ser utilizados na estabilização de solos, desde produtos tradicionais como cal, cimento e betume, até materiais alternativos como os obtidos a partir de subprodutos do processamento industrial (ALCÂNTARA, 1995).

## 2.4.2.1 Estabilizantes comerciais – tradicionais

### 2.4.2.1.1 Solo-Cimento

A mistura solo-cimento foi utilizada pela primeira vez em 1800, no Sul da Inglaterra, para uso no tratamento de leitos de estradas para veículos tracionados por cavalo, sendo o engenheiro inglês H.E Brook-Bradley, o precursor desta mistura (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION - PCA, 1960). No Brasil, os estudos com misturas de solo-cimento iniciaram em 1941, pela Associação Brasileira de Cimento Portland.

Os fatores que asseguram que a estabilização do cimento é amplamente utilizada devido: i) o cimento estar disponível na maioria dos países a um preço relativamente baixo; ii) o uso de cimento geralmente envolve menos cuidados e controles do que muitos outros estabilizantes; iii) há mais informações técnicas disponíveis sobre as misturas de solo tratadas com cimento do que sobre outros tipos de estabilização de solo; e iv) a maioria dos solos (exceto aqueles com alto conteúdo de matéria orgânica ou sulfato solúvel) pode ser estabilizada com cimento se for usado o suficiente com a quantidade de água adequada e executando uma boa compactação e cura (O'FLAHERTY et al., 2002).

O efeito produzido pelo cimento pode ser visto de duas formas distintas, a solos granulares e solos coesivos. No primeiro caso o aditivo destina-se principalmente a criar ligações nos contatos inter-granulares de modo a garantir resistência principalmente por relativa coesão. Já no caso de solos finos, os grãos do cimento acabam se comportando como núcleos aos quais se aderem a partículas do solo que os rodeiam, formando floculados de solo pelo efeito cimentante (MACHADO et al, 2013).

### 2.4.2.1.2 Solo-Cal

O solo cal atua como mecanismo destinado a reações de trocas catiônicas e floculação. Produzindo imediatamente alterações na plasticidade do solo, e em menor escala na resistência ao cisalhamento. Podem ainda, ocorrer reações pozolânicas entre o solo e a cal, e essas reações resultam em formações de vários compostos cimentantes e aglutinantes que aumentam a resistência e a durabilidade da mistura (MACHADO et al, 2013).

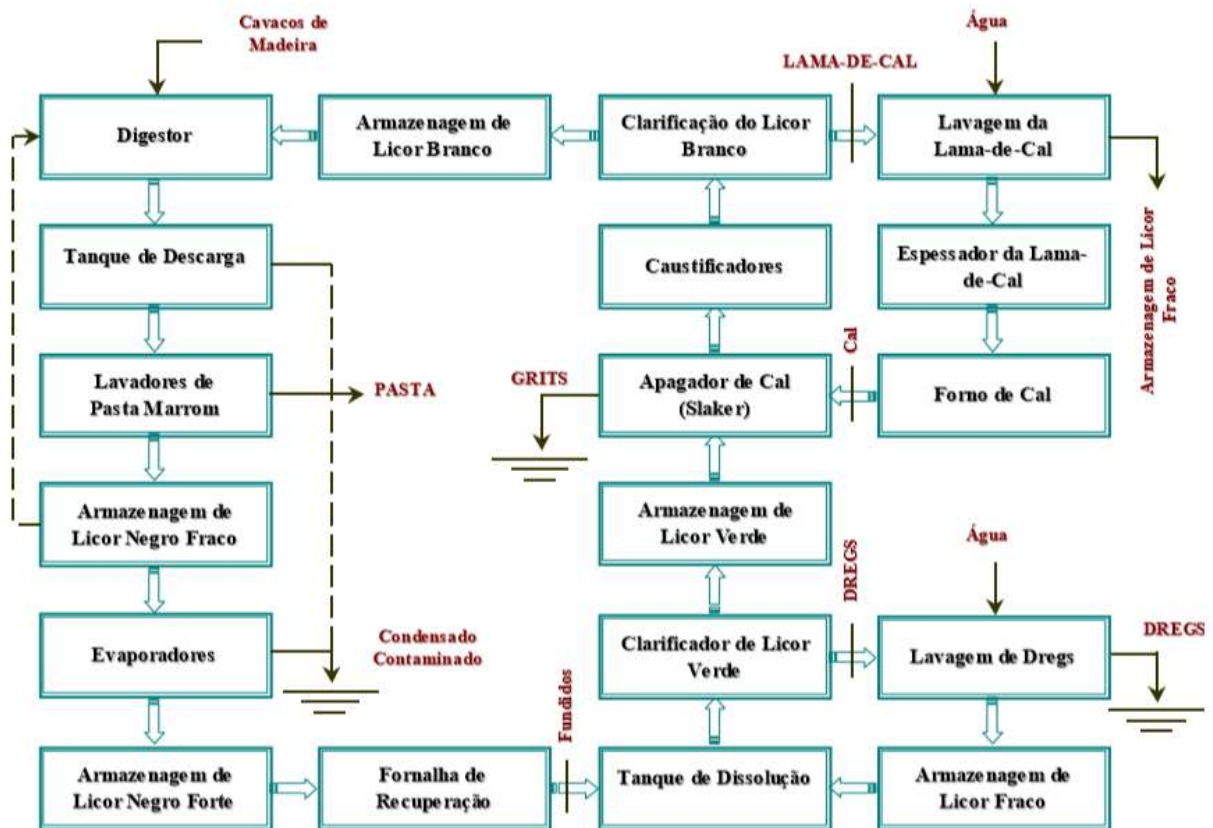
#### 2.4.2.2 Estabilizantes não tradicionais - Resíduos industriais

Historicamente, têm-se reconhecido o uso de resíduos industriais para estabilização química. Hogentogler (1937) realiza uma revisão de diversos fatos históricos envolvidos em tentativas de utilizar determinados produtos, como o uso da água do mar e sais deliquescentes ou mesmo a utilização do licor derivado do processamento de sulfito e do melão residual de indústria açucareira.

Os resíduos industriais são agentes estabilizantes de baixo custo, pois estão prontamente disponíveis nas áreas onde são produzidos, surgindo como alternativa econômica e ambiental. Geralmente, esses resíduos estão associados à existência de jazidas em áreas próximas ao empreendimento (PEREIRA et al., 2006). Dentre os principais resíduos industriais para uso em construção rodoviárias, pode ser citado o *Grits*. Este é um resíduo sólido que provém do processo de recuperação da soda cáustica, durante o cozimento da madeira de eucalipto para obtenção de celulose. A indústria de celulose e papel pode gerar além do *Grits*, outros diversos resíduos sólidos dependendo das características do processo e das técnicas de reaproveitamento empregadas, porém, podem variar entre unidades fabris, mesmo nos casos em que o produto final é mesmo (CPRH, 1998).

Na produção de celulose e papel, via processo denominado *Kraft* (pasta sulfato), que abrange o polpamento alcalino, algumas etapas são fundamentais, após o cavaqueamento da madeira nos pátios, as quais são, segundo Smook (1994): cozimento; preparo da massa pela lavagem, depuração e espessamento; branqueamento e recuperação de produtos químicos. Dentre as etapas de maior interesse para o estudo, que são determinantes na recuperação de produtos químicos são: concentração do licor negro; incineração do licor concentrado; caustificação do licor verde e recuperação da cal. A Figura 2 demonstra o fluxograma básico do processo *Kraft* com a indicação dos principais pontos de geração dos resíduos (*Grits*, *Dregs* e Lama de Cal), de interesse no presente trabalho.

Figura 2. Fluxograma da produção e recuperação do processo *kraft*, demonstrando a geração dos resíduos *Grits*, *Dregs* e Lama de cal.



Fonte: Pereira, 2005.

## 2.5 AVALIAÇÃO DE TRECHOS EXPERIMENTAIS DE ESTRADA

Com o intuito de definição de processos construtivos e análise de desempenho das composições obtidas após os testes experimentais em laboratório, procede-se com o dimensionamento de trechos para a avaliação do comportamento dos materiais e/ou composições, em condições reais de tráfego, carga, umidade, etc., (MACHADO et al, 2013).

Para a execução de trechos experimentais leva-se em consideração a estruturação de camadas de uma via florestal, que podem ser constituídas de diversas maneiras, porém, as mais comuns são compostas por regularização do subleito, reforço do subleito, e revestimento primário (MACHADO et al, 2013). A regularização do subleito abrange as atividades de conformação da via, por meio de raspagem com motoniveladora, e posterior compactação com rolo vibratório do tipo pé-de-carneiro, com o intuito de obtenção das condições necessárias de abaulamento e compactação para a referida obra (MACHADO et al, 2013).

Já a camada de reforço do subleito é uma camada projetada com material advindo de jazidas de empréstimos, ou ainda com a aplicação de materiais que desenvolvam e/ou proporcionem uma melhoria em relação a camada do subleito com o objetivo de elevar a capacidade de suporte da estrutura do pavimento (MACHADO et al, 2013).

E por fim, a camada de revestimento primário, essa é a camada final da via florestal, e tem como função receber e transmitir para as demais camadas o esforço realizado pelo tráfego. Por ser a camada final, deve apresentar excelentes condições como baixa rugosidade, bom intertravamento do material granular evitando perda do agregado e materiais soltos na pista, e principalmente, evitar a deformação e ocorrência de trilhos de rodas, assim, garantindo a qualidade e a segurança para os seus usuários (MACHADO et al, 2013).

### **2.5.1 Avaliação da superfície do trecho experimental**

A avaliação da superfície de uma via não pavimentada é um processo que visa fornecer subsídios para que se possa manter ou resgatar a integridade estrutural e funcional da via (GREENSTEIN; HUDSON, 1994). A avaliação leva em consideração os procedimentos denominado EATON, por meio da determinação do URCI – (*Unsurface Road Condition Index*), que corresponde ao PCI – (*Pavement Condition Index*), do sistema PAVER (Sistema de Gerência de Manutenção de Pavimentos). O URCI é determinado através da quantificação e análise de defeitos-tipo referentes a seção transversal, como os trilhos de rodas, corrugações, buracos, e perda de agregados. O URCI possui uma escala de condição da via que varia de zero (péssima) a 100 (excelente), baseado em valores-dedução (*Deduct-Value*) (EATON, et al., 1987).

A avaliação de estradas não pavimentadas pode ser realizada de duas formas distintas, sendo uma delas de forma rápida por meio de vistoria subjetiva da estrada, e outra de forma detalhada, com medidas dos defeitos em unidades amostrais que sejam representativas de um determinado trecho (EATON, et al., 1987). As alterações ocorridas na via, devem ser hierarquizadas em níveis de severidade (subjetivo), de acordo com o quanto isso impacta na utilização da via. Estes níveis são: *não se aplica; baixa; média e alta severidade*. Quanto aos pesos de cada nível o baixo considera 2 pontos, médio 4 pontos e alto 15 pontos. Cada defeito é avaliado separadamente para determinar as suas densidades por unidade de área (medida objetiva ou quantitativa) e nível de severidade, para que se possa determinar o valor-dedução (*Deduct-Value*), que é obtido por meio de gráficos (nomogramas) específicos para essa avaliação. Após, o cálculo de todos os valores-dedução para cada unidade amostral, são então

somados, a fim de se obter o valore-dedução total (VDT), e com base nos VDT's maiores ou iguais a 5, é possível se determinar o valor referente ao URCI (EATON, et al., 1987).



### 3 ESTUDO I - COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS DE SOLO E RESÍDUOS FABRIS DE CELULOSE E PAPEL PARA PAVIMENTAÇÃO DE ESTRADAS FLORESTAIS

#### 3.1 RESUMO

As estradas florestais geralmente transportam elevada carga (cerca de 57 t), e a longas distâncias, podendo chegar a raios superiores a 100 km. Portanto, precisam apresentar padrões construtivos que permitam manter a durabilidade destas estradas a longo prazo. Porém, na maioria das situações, são exigidas melhorias ao solo a qual será submetido a construção, dentre essas melhorias o processo de estabilização química é uma alternativa. Inclusive, estabilizantes químicos oriundos de subprodutos da indústria de papel e celulose tem despertado a atenção da pesquisa. O objetivo do presente trabalho foi testar alternativas para estabilização química de camadas de pavimento de estradas florestais utilizando solo e resíduos da indústria de papel e celulose. Amostras de solo foram coletadas de um trecho de estrada de uso florestal e foram elaboradas misturas em diferentes proporções (2%, 4%, 8% e 16%) com os resíduos *Grits* (GT), *Dregs* (DG) e Lama de cal (LC). O solo e as misturas de solo-resíduo foram submetidas aos ensaios para caracterização granulométrica, limites de consistência, curva de compactação e índice de suporte Califórnia (ISC). Os dados foram analisados por meio de estatísticas descritivas. Os dados de limites de consistência (IP e LP) foram analisados por meio de delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial 3x4, sendo três tipos de resíduo industrial (*Grits*, *Dregs* e Lama de Cal) e quatro percentuais (2, 4, 8 e 16%). Os valores, foram submetidos a análise de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade de variância pelo teste de Levene a 5% de probabilidade. Após testar os pressupostos, foi realizada a análise de variância e teste de comparações múltiplas das médias por Dunnett a 5% de probabilidade. Também, empregou-se a análise de correlação de Spearman à 10%, 5% e 1% probabilidade para verificar a relação entre as variáveis provenientes dos ensaios e variáveis anteriormente descritos. O solo avaliado se enquadrou no grupo ML, conforme a classificação USCS, e em relação à classificação TRB, se enquadrou no grupo A-4, evidenciando a presença materiais siltsos e areias muito finas com baixa compressibilidade e plasticidade. A adição de *Dregs* aumentou o índice de plasticidade (IP), tornando difícil a sua utilização em termos construtivos, apesar de o mesmo ter apresentado um incremento nos Índices de Suporte Califórnia, para os menores percentuais de mistura (2% e 4%). Já a mistura de solo com *Grits*, apresentou tendência de redução no IP nos três menores percentuais utilizados e incremento na densidade do solo, apesar de não refletir aumentar o ISC. Quanto a mistura de solo com Lama de Cal, houve incremento no ISC nos menores percentuais (2 e 4%), não havendo aumento do IP, porém, apresentando expansão superior a 0,5%, mas, somente na mistura de 16%. De modo geral, a mistura de solo com Lama de Cal apresentou os melhores resultados, podendo ser indicada para estabilização de camadas como reforço de um subleito, caso seja viável técnica e economicamente.

**Palavras-chave:** Estabilização do solo, Índice de Suporte Califórnia, resíduos industriais.

### 3.2 INTRODUÇÃO

A crescente demanda de abastecimento por produtos florestais no Brasil, tem levado às empresas e produtores independentes a cultivar florestas em regiões cada vez mais distantes em relação ao local de consumo, implicando, na maioria dos casos, na necessidade do uso de veículos de transporte extrapesados (acima de 57 de peso bruto total combinado), com o objetivo de reduzir custos com a logística da madeira e, dessa forma, viabilizar economicamente a atividade florestal.

Entretanto, tal condição tem afetado diretamente a conservação das estradas florestais, uma vez que, o emprego de veículos de alta tonelagem exige obras de engenharia viária que garantam a trafegabilidade e tenham boa relação custo benefício a longo prazo. Porém, este é um desafio complexo, em virtude de que na maioria das situações, os locais ou solos utilizados não revelarem características construtivas adequadas conforme as requisições de tráfego que serão impostas (ZHANG; CAI; LIU, 2017).

Desse modo, é evidente que o principal problema associado à falta de capacidade de suporte de estradas florestais é, basicamente, relacionada ao solo a ser utilizado. Tal consideração, tem motivado a busca por alternativas técnicas de estabilização do solo, visando atender as exigências dos projetos viários, por meio do aprimoramento das propriedades de mecânicas do solo, adequando-o para um determinado uso e melhorando a sua condição de suporte do solo (MOUSAVI; KARAMVAND, 2017).

A estabilização do solo pode ser executada por meio de métodos mecânicos ou químicos (LAUFER, 1967). A estabilização mecânica é o método mais antigo adotado na construção de estradas e consiste em alterações na proporção das partes sólidas, líquidas e gasosas (sistema trifásico) do solo por meio de compactação ou correções granulométricas (RAJKAMAL et al., 2016; MATSUMURA; TATSUOKA, 2018).

No caso da estabilização química, opostamente aos métodos mecânicos, esta é empregada com o propósito de alterar a estrutura do solo, através de reações químicas que contribuem para alcançar melhores resultados para o processo de compactação (DU et al., 2016). Inúmeros estabilizantes químicos têm sido utilizados, desde produtos comerciais consagrados no mercado como o cimento Portland, cal e pozolana (AL-SWAIDANI; HAMMOUD; MEZIAB, 2016), até materiais considerados resíduos ou subprodutos das mais variadas indústrias, como o resíduo de carboneto de cálcio (DU et al., 2016) e subprodutos da indústria de papel e celulose (ZHANG; CAI; LIU, 2017).

Pesquisadores têm relatado as vantagens relacionadas a estabilização química comparado a outros métodos ou técnicas construtivas, sobretudo, devido ao fato de que a substituição de solo inadequado por solo de qualidade mecânica superior ou material rochoso torna-se cada vez mais uma prática não econômica e não ecológica. Além disso, o emprego de estabilizantes químicos convencionais como o cimento, pode, em muitos casos, não ser viável, devido ao custo crescente de agentes químicos a partir de fontes não renováveis e às preocupações ambientais relacionadas à sua produção (AL-SWAIDANI; HAMMOUD; MEZIAB, 2016).

Dessa forma, os resíduos gerados no processo de produção industrial têm o potencial de serem úteis para emprego no processo de estabilização química do solo, sendo uma alternativa ambientalmente adequada, pois, muitas vezes, mesmos os resíduos industriais não poluentes, são descartados em aterros decorrendo em passivos ambientais. Contudo, a aplicabilidade dos resíduos para fins viáveis depende da composição deste e reatividade com o solo, o qual pode ser avaliada por meio de ensaios geotécnicos.

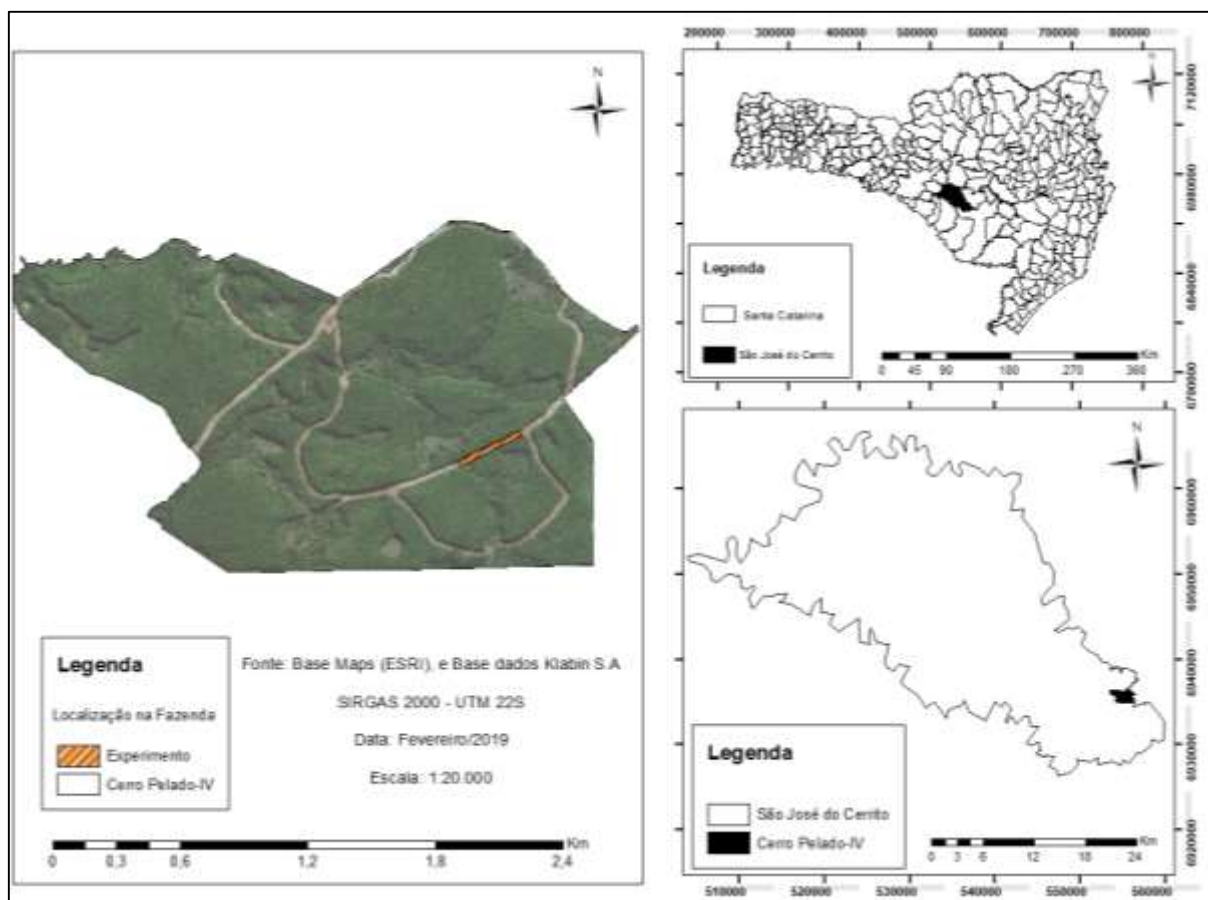
Diante do exposto, o propósito do presente estudo foi testar o comportamento mecânico de misturas de solo de resíduos da fabricação de papel e celulose como alternativas para estabilização química de solo destinado à construção de camadas de pavimento de estradas florestais.

### 3.3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.3.1 Área de estudo

O solo utilizado no presente estudo é procedente de uma fazenda destinada à produção de pinus para celulose, denominada Cerro Pelado-IV, pertencente à empresa Klabin S.A. A fazenda está localizada no município de São José do Cerrito, Planalto Sul do Estado Santa Catarina, Brasil (Figura 3). O tipo de solo é Neossolo, e o clima da região é do tipo Cfb, segundo a classificação de Köppen, com verão temperado e inverno seco e com temperatura média anual entre 14 e 16 °C. A precipitação pluviométrica média anual varia de 1.600 mm e 1.900 mm e se apresenta bem distribuída ao longo de todos os meses, sem período de estiagem específico (ALVARES et al., 2014). Segundo dados do INMET (2018), nos últimos dez anos a precipitação total anual variou de 1.899 a 2.989 mm para a região de estudo, com média de 2.338 mm.

Figura 3. Mapa de localização do local de coleta de solo para o estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

### 3.3.2 Solo e resíduos testados

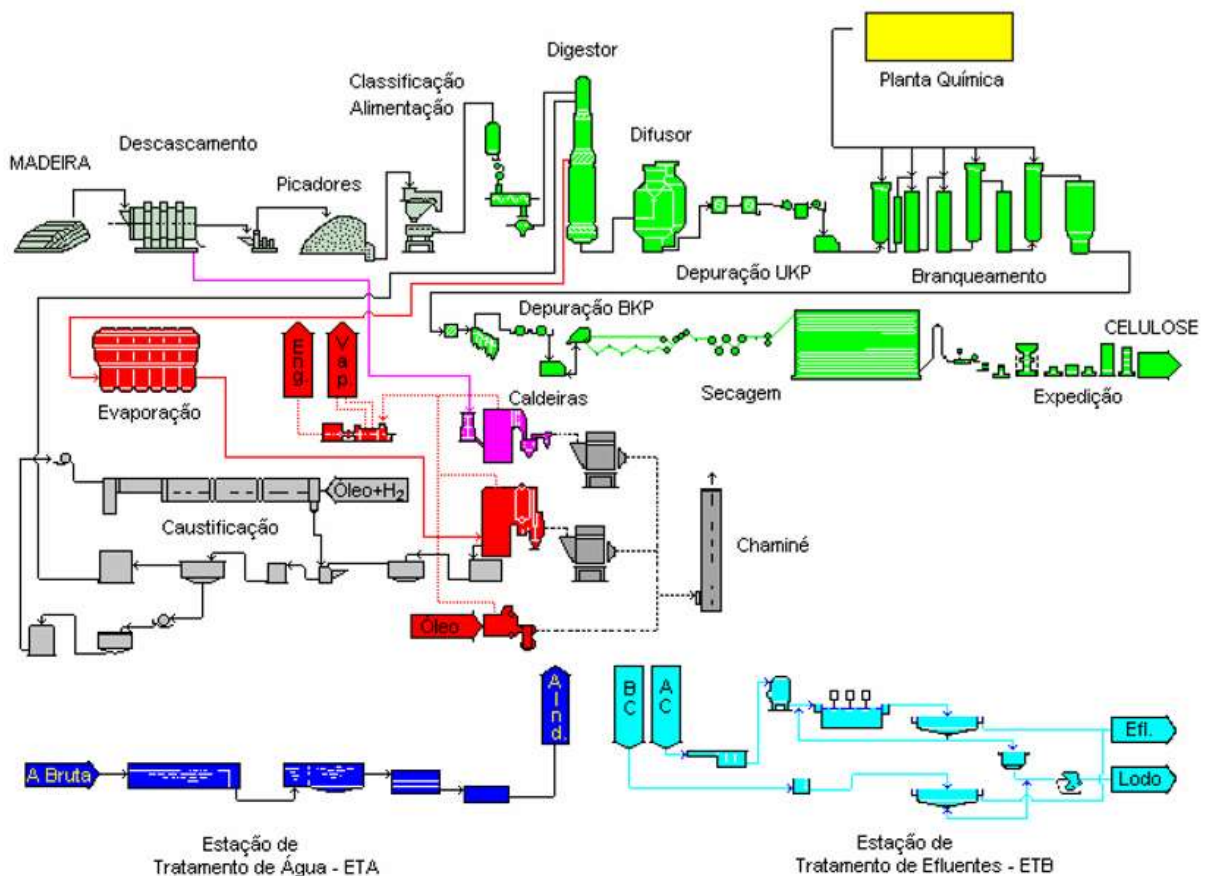
Na área de estudo, foram coletadas um total de 16 amostras de solo deformadas a partir de um trecho de estrada florestal de uso primário, caracterizada pelo tráfego intenso de veículos somente no momento da colheita e transporte da madeira, cujas coordenadas centrais são  $27^{\circ}42'16''$  S e  $50^{\circ}26'08''$  W e está a 900 metros de altitude (Figura 3).

O procedimento de coleta de solo consistiu em obter amostras das laterais e do centro da estrada a cada 30 metros de distância ao longo de todo trecho especificado. Cada amostra possuía em torno de 80 kg de solo e foram retiradas a uma profundidade aproximada de até 30 cm. As amostras foram coletadas em pontos de até 4% de declividade e foram numeradas conforme a ordem de coleta.

Os resíduos (*Dregs*, *Grits* e Lama de cal) da indústria de celulose e papel, foram provenientes da empresa Klabin S.A., localizada no município de Otacílio Costa, SC. A geração desses resíduos provém do processo de polpação *kraft*, cujo é dividido em três linhas distintas

denominadas de: linha verde (circuito da polpa), linha vermelha (circuito de recuperação do licor preto) e linha cinza (circuito de recuperação do licor branco). Essas três linhas por si só completam dois ciclos distintos, descritos por Patinõl (1998): (i) o ciclo do sódio (circuito líquido) e (ii) o ciclo do cálcio (circuito sólido), conforme a Figura 4.

Figura 4. Processo de polpação *kraft*, linha verde, vermelha e cinza.



Fonte: Wolff, 2008.

No processo caracterizado como linha verde (circuito da polpa), os cavacos de madeira são aquecidos em um vaso pressurizado (digestor) juntamente com o licor de cozimento (licor branco), solução aquosa constituída de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S). O processo *kraft* é, então, caracterizado pela recuperação dos reagentes utilizados, que retornam ao digestor com uma perda máxima de 5%. Como vantagens adicionais, tem-se a produção de vapor, fornecido às várias etapas do processo, tais como cozimento, branqueamento e secagem, e a geração de energia elétrica, que torna o empreendimento auto-suficiente do ponto de vista energético. Pelo processo *kraft*, a polpa resultante é escura e, conforme a finalidade a que se

destina, necessita de branqueamento para ser comercializada como celulose branqueada. Sendo assim, a polpa obtida no digestor é enviada para a seção de lavagem (difusor), onde são retirados os produtos químicos utilizados e compostos orgânicos dissolvidos. A polpa lavada é conduzida a uma etapa de depuração (peneiramento), onde se tem a retirada de nós, cavacos não cozidos, feixes de madeira e impurezas normais ao processo (areia e outros) e o engrossamento da massa (WOLFF, 2008).

Já na linha vermelha (circuito de recuperação do licor preto), com a dissolução da lignina e separação das fibras, ocorre a formação no digestor do licor preto fraco, composto de lignina, carboidratos (celulose e hemicelulose dissolvidos), resinas e substâncias extrativas naturalmente presentes na madeira, além do NaOH e Na<sub>2</sub>S. O licor preto fraco segue então para uma unidade de evaporação, onde pode ser concentrado até cerca de 72% de sólidos, transformando-se no licor preto forte, sendo posteriormente enviado para a caldeira de recuperação. Neste equipamento, a queima da matéria orgânica concentrada produzirá a energia térmica necessária para a produção de vapor e a geração de eletricidade.

Durante o processo de queima, os compostos orgânicos ligados ao sódio (Na) são convertidos em carbonato de sódio (NaCO<sub>3</sub>) e ligados ao enxofre (S), em sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S), podendo ainda haver a formação do sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Esta massa de sais minerais fundidos resultante, ou *smelt*, é dissolvida em solução aquosa, chamada de licor branco fraco, e se transforma no licor verde, que contém a mistura de NaCO<sub>3</sub> e Na<sub>2</sub>S. O licor verde precisa passar por uma etapa de purificação para eliminação de *Dregs*, que são impurezas insolúveis constituídas de material não queimado na caldeira, além de areia e compostos metálicos (WOLFF, 2008).

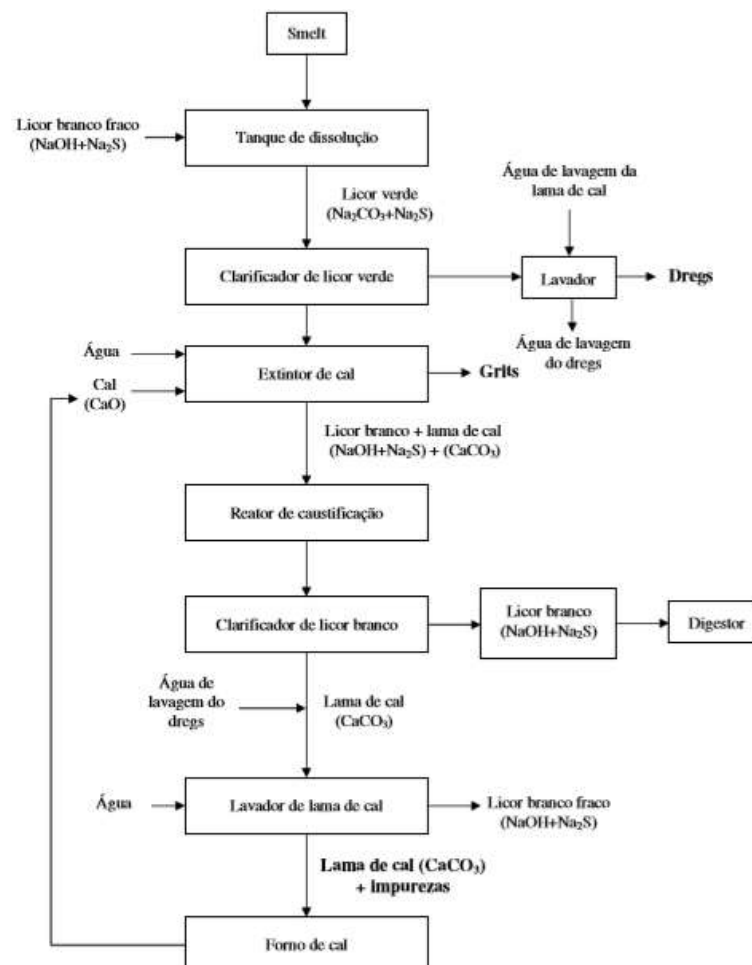
Na terceira e última parte, a linha cinza (circuito de recuperação do licor branco), onde, o licor verde clarificado é bombeado ao extintor de cal. Nessa etapa é dosada a uma taxa calculada misturando-se ao licor verde (NaCO<sub>3</sub> + Na<sub>2</sub>S) e formando o licor branco (NaOH+Na<sub>2</sub>S) e a Lama de cal (CaCO<sub>3</sub>). A cal não reagida, conhecida como *Grits*, sedimenta-se no classificador sendo, então, empurrada para fora do extintor.

A mistura licor branco e lama de cal segue por gravidade para os caustificadores, depois para os clarificadores, para a separação da lama de cal precipitada do licor. O licor clarificado é bombeado então para o(s) digestor(es), fechando assim o “ciclo do sódio” (circuito líquido); seguindo a lama para lavagem. A lama retirada dos clarificadores de licor branco é enviada a um filtro rotativo onde o licor arrastado é extraído, retornando ao clarificador, e a lama é enviada ao lavador de lama, onde se adiciona água para a lavagem por diluição com o objetivo de retirar dela toda a soda (NaOH) possível antes da etapa de calcinação.

A água de lavagem da lama de cal, chamada de licor branco fraco, segue para a caldeira de recuperação para dissolver o *smelt*. A lama de cal lavada é bombeada a um filtro de vácuo para lavagem final e desaguamento, sendo então conduzida ao forno de cal, onde a lama de cal ( $\text{CaCO}_3$ ) é convertida em cal ( $\text{CaO}$ ) com liberação de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Quando é grande a quantidade de impurezas presentes na lama de cal ou quando há um excesso de produção, ela não é enviada para o forno de cal, devendo ser retirada do sistema. O filtrado do filtro de lama retorna para ser usado na lavagem.

Após a regeneração da cal nos fornos, a mesma é hidratada no extintor convertendo-se novamente em  $\text{Ca(OH)}_2$ , que retorna aos caustificadores para processar mais licor verde, fechando-se o “ciclo do cálcio” (circuito sólido) (WOLFF, 2008). Todo o processo pode ser entendido de forma rápida e objetiva por meio do fluxograma abaixo (Figura 5). Quanto as características químicas referentes a estes resíduos, estão sendo expressas no Anexo 1.

Figura 5. Fluxograma da produção de resíduos *Dregs*, *Grits* e Lama de cal, no processo de fabricação de celulose.



Fonte: Wolff, 2008.

Após coletados, os materiais (solo e resíduos) foram armazenados em sacos plásticos para permitir o transporte até as dependências do Laboratório de Operações e Estradas Florestais (LOPEF), localizado no Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV), da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lages, SC. Neste local, as amostras foram secas ao ar e o solo foi, posteriormente, destorroado e passado em peneira nº 4 (4,76 mm) (Figura 6).

Figura 6. Amostra de solo armazenado em saco plástico (esquerda), material peneirado, (direita).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

### 3.3.3 Misturas solo-resíduo testadas

Após os materiais estarem secos ao ar e devidamente peneirados, foram confeccionadas 12 misturas a partir de composições de solo e resíduos:

- 1) DG 2%: mistura composta de 98% de solo e 2% de *Dregs* secos ao ar;
- 2) DG 4%: mistura composta de 96% de solo e 4% de *Dregs* secos ao ar;
- 3) DG 8%: mistura composta de 92% de solo e 8% de *Dregs* secos ao ar;
- 4) DG 16%: mistura composta de 84% de solo e 16% de *Dregs* secos ao ar;
- 5) GT 2%: mistura composta de 98% de solo e 2% de *Grits* secos ao ar;
- 6) GT 4%: mistura composta de 96% de solo e 4% de *Grits* secos ao ar;
- 7) GT 8%: mistura composta de 92% de solo e 8% de *Grits* secos ao ar;
- 8) GT 16%: mistura composta de 84% de solo e 16% de *Grits* secos ao ar;
- 9) LC 2%: mistura composta de 98% de solo e 2% de Lama de cal secos ao ar;
- 10) LC 4%: mistura composta de 96% de solo e 4% de Lama de cal secos ao ar;
- 11) LC 8%: mistura composta de 92% de solo e 8% de Lama de cal secos ao ar;
- 12) LC 16%: mistura composta de 84% de solo e 16% de Lama de cal secos ao ar;

O solo puro (SP), isto é, isento de mistura, também, foi avaliado como forma de testemunha do estudo. Vale ressaltar que não foi considerado tempo de cura para nenhuma das misturas, sendo os ensaios realizados imediatamente após a preparação das mesmas.

### **3.3.4 Ensaios laboratoriais e determinações**

#### **3.3.4.1 Análise granulométrica, teor de matéria orgânica e classificação do solo**

A análise granulométrica foi realizada somente para o solo puro (SP) e foi realizada conforme a metodologia proposta pelo DNER – ME 051 (DNER, 1994a), sendo as frações sólidas grossas a partir da areia fina (diâmetro acima de 0,05 mm) separadas por peneiramento e as frações finas (silte e argila) separadas por sedimentação. Foram analisadas um total de três repetições de 1 kg cada para a separação por peneiramento e de quantidade suficiente para separação por sedimentação.

Por meio dos valores da análise foi determinada a curva granulométrica do solo e, junto aos valores de limites de consistência, foi realizada a classificação do solo puro quanto a USCS (*Unified Soil Classification System*) e a associação AASHTO - TRB (*American Association of State Highway and Transportation Officials - Transportation Research Board*).

#### **3.3.4.2 Limites de consistência e atividade da argila**

Para determinação dos limites de consistência do solo puro e 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). Para os ensaios foram utilizadas quatro repetições, sendo o índice de plasticidade (IP) calculado pela diferença entre os valores de LL e o LP ( $IP = LL - LP$ ).

A atividade da argila (AA) do solo puro e misturas foi determinada de acordo com o método proposto por Skempton, expresso pela razão entre o IP e o percentual de argila presente no solo, podendo ser classificada conforme sua atividade inativo ( $<0,75$ ), normal ( $0,75$  a  $1,25$ ) e Ativa ( $>1,25$ ) (PINTO, 2006).

### 3.3.4.3 Parâmetros da curva de compactação do solo

Os parâmetros da curva de compactação, densidade máxima do solo (D.Max) e a umidade ótima de compactação (U.Ot), do solo puro e misturas foram obtidos por meio do Ensaio de Proctor em Ensaio em Energia Normal, o qual foi realizado de acordo com o método DNER-ME 129 (DNER, 1994 d). 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.

### 3.3.4.4 Índice de Suporte Califórnia e Expansão ISC

O Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão ISC do solo puro e misturas foram obtidos por conforme método do DNER-ME 049 (DNER, 1994 e). No ensaio empregou-se a energia de compactação intermediária, sendo realizado em três pontos de umidades: um ponto na umidade ótima de compactação; um abaixo; e outro acima; conforme obtido no ensaio de *Proctor* normal.

### 3.3.5 Análise dos dados

Todos os dados foram analisados, primeiramente, por estatísticas de medida de tendência central (média) e dispersão (desvio padrão). Os dados de limites de consistência (IP e LP) foram analisados por meio de delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial 3x4, sendo três tipos de resíduo industrial (*Grits*, *Dregs* e Lama de Cal) e quatro percentuais (2, 4, 8 e 16%). Os valores, primeiramente, foram submetidos a análise de normalidade pelo teste de *Shapiro-Wilk* e homogeneidade de variância pelo teste de *Levene* a 5% de probabilidade. Após testar os pressupostos, foi realizada a análise de variância e teste de comparações múltiplas das médias por *Dunnett* a 5% de probabilidade.

Também, empregou-se a análise de correlação de *Spearman* à 10%, 5% e 1% probabilidade para verificar a relação entre as variáveis provenientes dos ensaios e variáveis anteriormente descritos.

### 3.4 RESULTADOS

#### 3.4.1 Classificação e granulometria do solo

O solo puro (SP) se enquadrou no grupo ML conforme a USCS, o que caracteriza a presença materiais siltosos e areias muito finas com baixa compressibilidade. Em relação à classificação TRB, este se enquadrou no grupo A-4, caracterizando como material silto argiloso, não plástico. Em relação à granulometria (Tabela 4 e Figura 7), verificou-se que o solo estudado é composto, principalmente, por partículas de argila (46,5%), areia fina (16,0%) e silte (12,7%), tendo, em média, 16,1% de partículas grossas ( $> 4,76$  mm), nesse caso o teor de matéria orgânica não foi considerada.

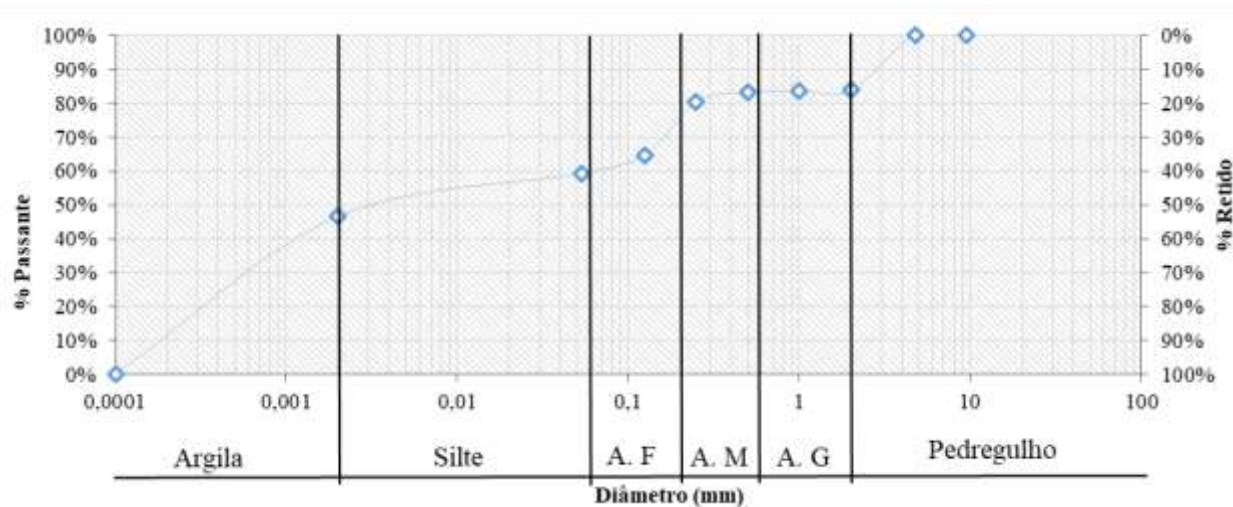
Tabela 4. Valores médios ( $\pm$ desvio-padrão) das frações minerais constituintes do solo.

Argila	Silte	Areia					Pedregulho
		Muito fina	Fina	Média	Grossa	Muito grossa	
46,5%	12,7%	5,3%	16,0%	2,7%	0,4%	0,4%	16,1%
$\pm 0,05$	$\pm 0,11$	$\pm 0,14$	$\pm 0,4$	$\pm 0,1$	$\pm 0,06$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$

Argila:  $\varnothing < 0,002$  mm; Silte:  $\varnothing$  de 0,002 a 0,06 mm; Areia Fina:  $\varnothing$  de 0,06 a 0,2 mm; Areia Média:  $\varnothing$  de 0,2 a 0,6 mm; Areia Grossa:  $\varnothing$  de 0,6 a 2 mm; e Pedregulho:  $\varnothing > 2$  mm.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Figura 7. Curva granulométrica do solo puro.



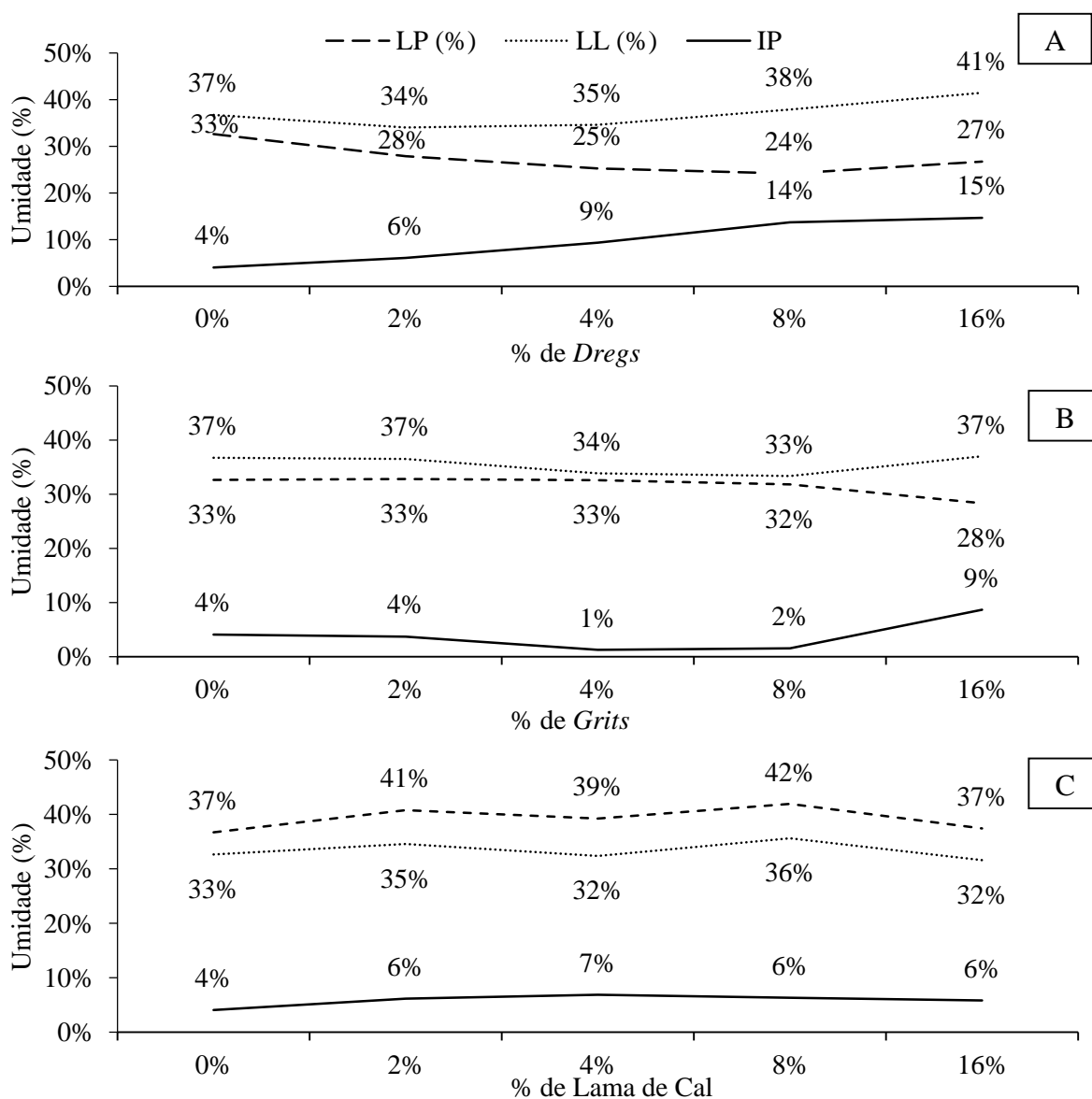
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

A.F = Areia Fina; A. M = Areia Média; A. G = Areia Grossa.

### 3.4.2 Limites de consistência

Os resultados mostram que o IP para o *Dregs* aumenta com um aumento no conteúdo do mesmo, em relação ao solo puro, chegando a atingir valores 15% (Figura 8a). A mistura com LC elevou os valores de IP de 4% para 6%, porém, se manteve constante à medida que se acrescia o percentual do resíduo (Figura 8b). Enquanto que o *Grits*, chegou a reduzir de 4% para 1% o IP, até as doses intermediárias da mistura e, posteriormente, aumentando para 9%, no maior percentual do resíduo (Figura 8c).

Figura 8. Índices de Consistência para as misturas de Solo-resíduos *Dregs* (A), *Grits* (B) e Lama de Cal (C).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

LP = Limite Plasticidade; LL = Limite de liquidez; IP = Índice de Plasticidade.

Os valores da variável LP atenderam a pressuposição de normalidade ( $p=0,5873$ ) e homogeneidade de variâncias ( $p=0,1446$ ). A variável IP, entretanto, foi transformada pela função Log y para permitir o atendimento do pressuposto de normalidade ( $p=0,1562$ ). De acordo com a análise de variância, os tratamentos revelaram diferenças significativas em relação ao LP e ao IP (Tabela 5).

Tabela 5. Análise de variância para as misturas químicas considerando o Limite de Plasticidade (LP) e o Índice de Plasticidade (IP). Análise considerando a transformação da variável IP segundo a função Log y.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Valor de <i>F</i>
----- LP -----				
Tratamento	12	612,61	51,05	53,03**
Resíduo	37	35,62	0,96	
Total	49	648,24		
----- IP -----				
Tratamento	12	23,08	1,92	13,12**
Resíduo	35	5,13	0,15	
Total	47	28,22		

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Conforme o teste de médias por *Dunnnett* (Tabela 6), todas as misturas com *Dregs*, independente das proporção testada, reduziram o LP significativamente em relação ao solo puro, sendo a proporção de 8% aquela que resultou no menor valor. Comportamento similar pode ser observado para o *Grits* a 16%, que reduziu a umidade para o índice de plasticidade em 4,32. Já o tratamento Lama de Cal (LC) 8% que aumentou significativamente o limite de plasticidade.

Tabela 6. Teste de comparações múltiplas para as médias por Dunnett para os Limites de Plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) considerando o Solo puro (SP) como tratamento controle vs os demais tratamentos envolvendo *Dregs* (DG), *Grits* (GT) e Lama de Cal (LC), nas proporções de 2, 4, 8 e 16%.

Tratamento	----- LP -----		----- IP -----	
	Média ± desvio	vs. SP	Média ± desvio	vs. SP
SP	32,66 ± 1,09	--	4,05 ± 1,21	--
DG 2%	27,93 ± 0,41	-4,73*	5,90 ± 0,53	1,85
DG 4%	25,27 ± 0,27	-7,39*	9,37 ± 0,83	5,32*
DG 8%	24,18 ± 1,17	-8,48*	13,35 ± 4,05	9,30*
DG 16%	26,75 ± 0,81	-5,91*	15,10 ± 0,30	11,05*
GT 2%	32,81 ± 0,47	0,15	3,30 ± 0,26	-0,75
GT 4%	32,61 ± 0,97	-0,05	1,27 ± 0,61	-2,77*
GT 8%	31,80 ± 0,23	-0,86	1,62 ± 1,34	-2,42
GT 16%	28,34 ± 1,17	-4,32*	8,00 ± 0,56	3,95
LC 2%	34,56 ± 1,18	1,90	7,05 ± 1,39	3,00
LC 4%	32,38 ± 1,73	-0,28	9,47 ± 4,77	5,42
LC 8%	35,62 ± 0,31	2,95*	6,32 ± 1,73	2,27
LC 16%	31,60 ± 1,21	-1,06	5,82 ± 1,42	1,77

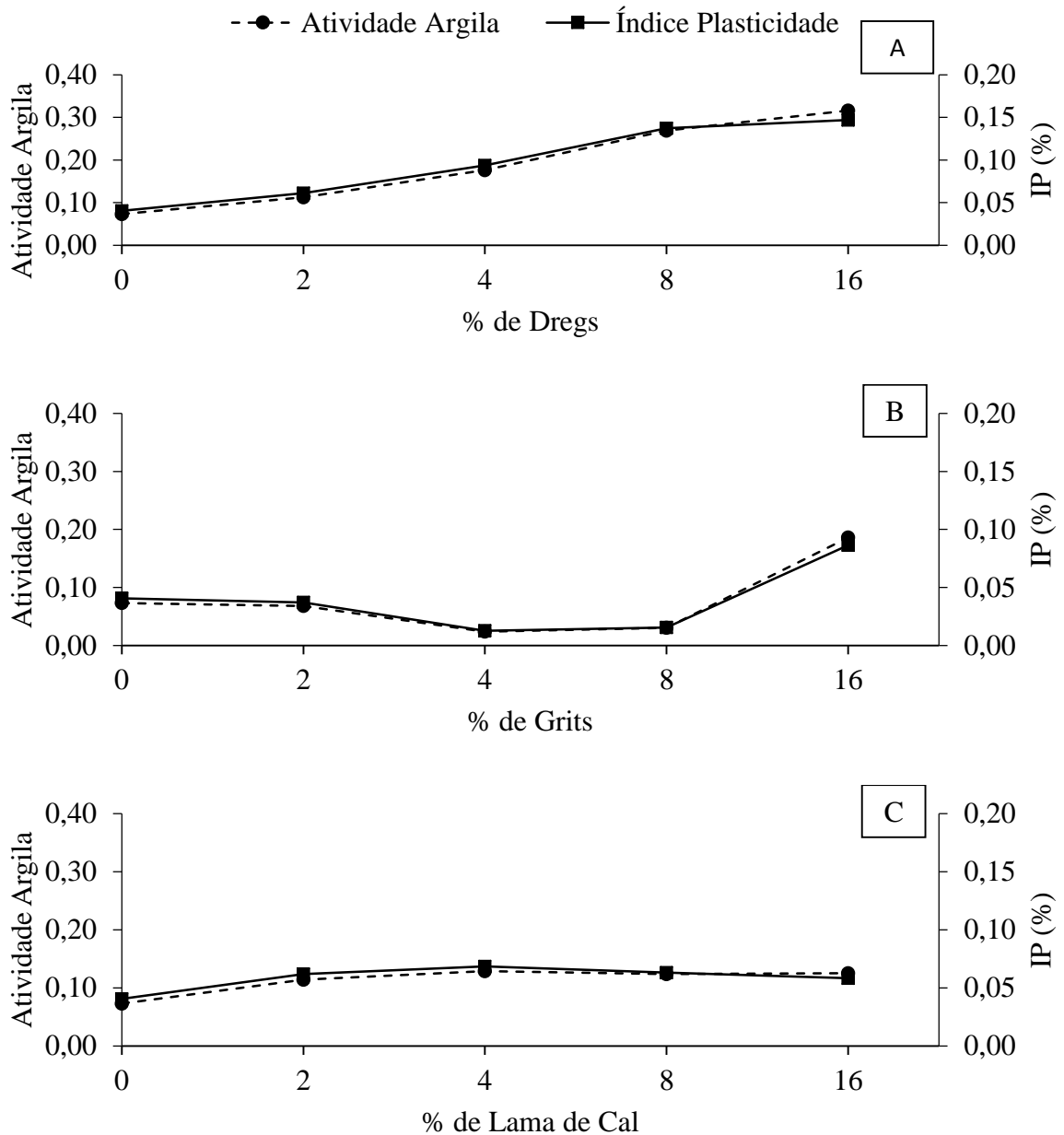
\* Significativo a 5% de probabilidade.

Variável IP transformada segundo função Log y.

Em relação ao IP, as misturas com DG aumentaram significativamente o índice conforme foi maior proporção de mistura. No caso das misturas com GT, a tendência foi de redução do IP quando aplicado até 8% do estabilizante, porém, somente na proporção de 4% a redução foi significativa. Não houveram diferenças significativas entre os valores de IP entre as misturas de LC e o SP.

Quanto aos resultados de atividade da argila (AA) (Figura 9), é possível verificar que, embora a AA tenha sido classificada como inativa para todas as misturas, houveram alterações conforme o tipo e proporção de mistura, em mesma magnitude que a alteração no IP.

Figura 9. Atividade da argila em função do valor de índice de plasticidade, para as misturas de solo-resíduo *Dregs* (A), *Grits* (B) e Lama de Cal (C).



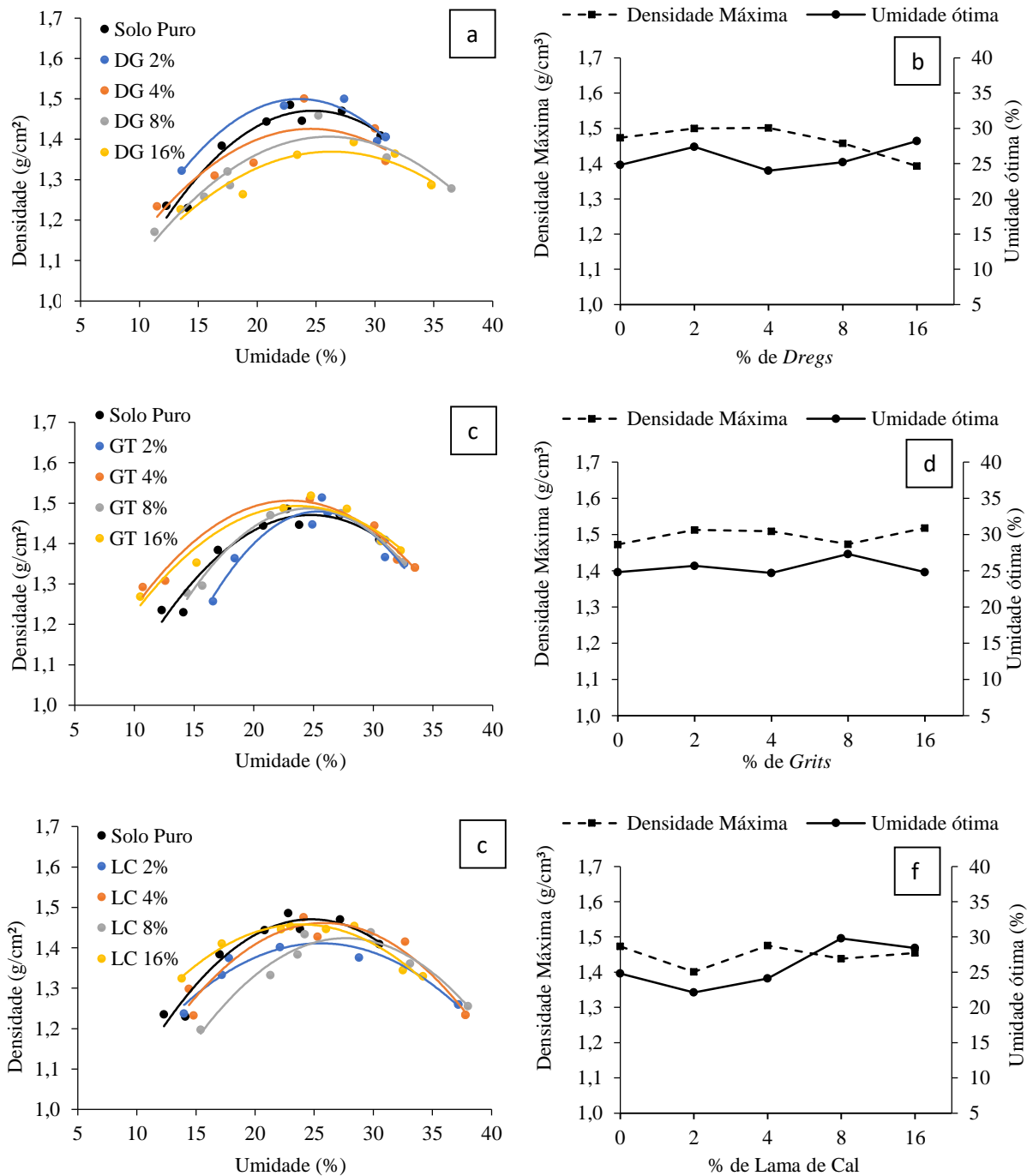
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

### 3.4.3 Parâmetros da curva de compactação

A curva de compactação do solo puro e misturas com *Dregs* (Figura 10a), teve um deslocamento para cima e esquerda quando foi aplicado 2% de proporção, resultando em uma D.Max maior e menor valor de U.Ot. (Figura 10b). Porém, a partir de 4% de proporção de

mistura com *Dregs*, houve tendência de deslocamento da curva de compactação para baixo e direita e, conseqüente, menor valor de D.Max e maior valor de umidade ótima de compactação.

Figura 10. Curvas de compactação para as misturas de solo-resíduo, em comparação ao solo puro *Grits* (a), *Dregs* (b) e Lama de Cal (c), e suas respectivas umidades ótimas e densidades máximas observada *Grits* (d), *Dregs* (e) e Lama de Cal (f).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

GT: *Grits*; DG: *Dregs*; LC: Lama de Cal.

Quanto às misturas com *Grits* (Figura 10c e d), conforme aumentou a proporção do agente químico, a curva de compactação tendeu a deslocar para cima e para esquerda, sendo maior o valor de D.Max e menor o valor de U.Ot. Quando aplicada a proporção de 4%.

Já as misturas de Lama de Cal (Figura 10e e f), a curva tendeu a deslocar para baixo e direita, resultando em redução da densidade máxima e aumento da umidade ótima de compactação.

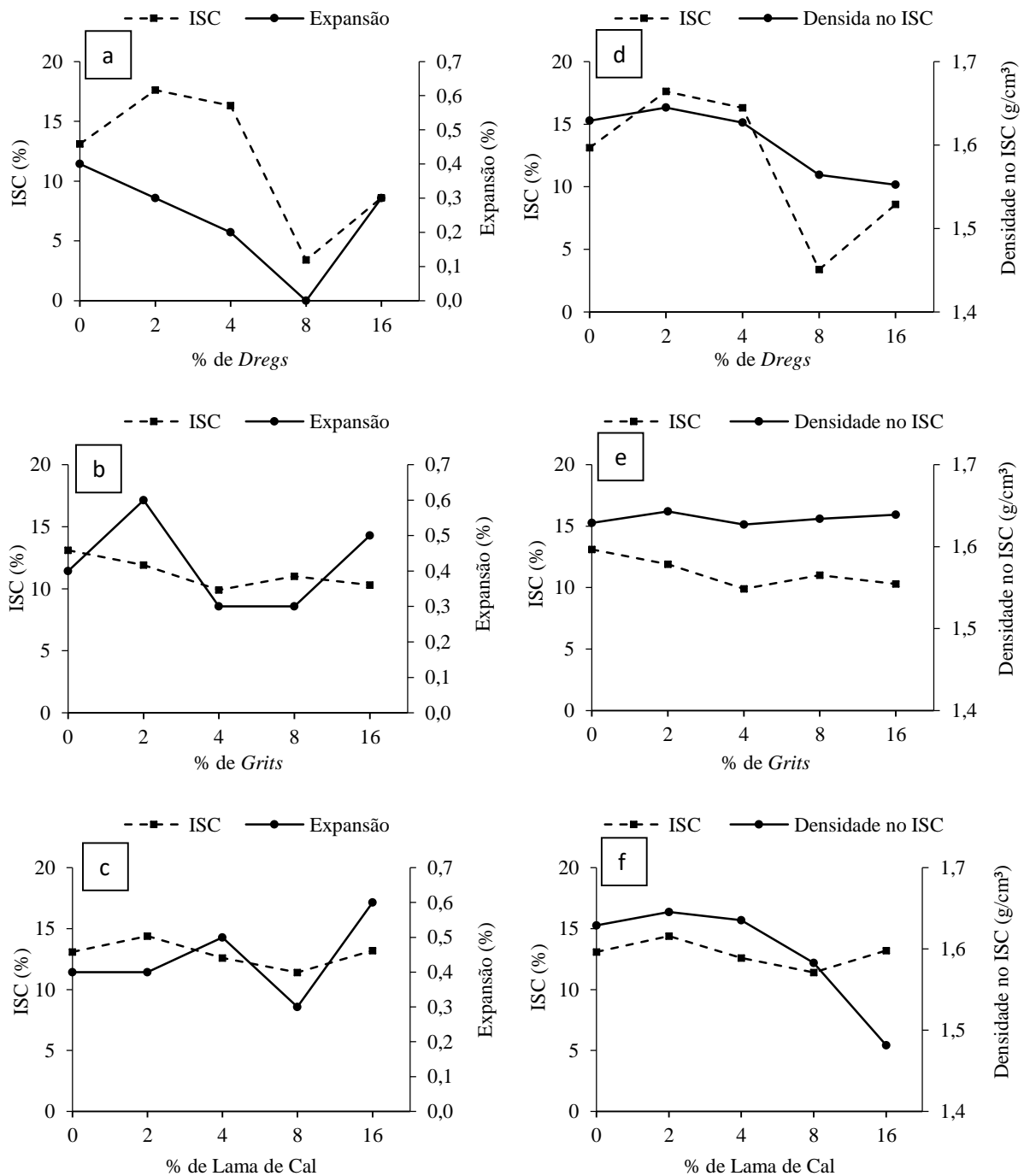
### 3.4.4 Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão ISC

As misturas de solo com *Dregs* resultaram em incremento do ISC nos percentuais de 2 e 4% (34,3% e 24,4%, respectivamente), porém, para os percentuais de 8 e 16% houve redução do ISC (74,05% e 34,35%, respectivamente) (Figura 11a), em concomitância com a redução de densidade no ISC, onde valores foram 4,29% e 4,91% menores, respectivamente, para os últimos percentuais citados (Figura 11d). A Expansão ISC foi linearmente até a proporção de 8% de mistura, contudo, voltando a subir na proporção de 16%.

Em relação às misturas de solo com *Grits*, estas ocasionaram uma redução de até 20% no ISC, com oscilação dos valores Expansão ISC (Figura 11b), quase não havendo diferenças quanto aos valores de densidade no ISC (Figura 11e).

Já as misturas de solo com Lama de Cal, quando foi adotado um percentual de 2%, houve incremento no ISC (10%), porém, a medida o percentual de mistura foi aumentado, esse valor reduziu, atingindo queda de aproximadamente 1% na mistura de 16%, com expansão superior a 0,5% (Figura 11c), havendo redução da densidade no ISC à medida que se incrementou a quantidade do resíduo na mistura (Figura 11f).

Figura 11. Referente aos ISC, expansão e densidade na moldagem do ISC obtido para as misturas de solo-resíduos *Dregs* (a, d), *Grits* (b, e) e Lama de Cal (c, f).



Fonte: Elaborado pelo Autos, 2018.

### 3.4.5 Correlações entre variáveis

Observando, primeiramente, as variáveis relacionadas aos limites de consistência do solo, verificou-se que o LP somente apresentou correlação significativa e negativa com o IP e

AA, demonstrando que as misturas que resultaram em LP, tenderam a apresentar a redução destas outras variáveis (Tabela 7). Já o LL não apresentou correlação com o LP e IP, porém, teve apresentada relação significativa com a AA e D.Max, sendo positiva com esta primeira e negativa com a segunda. No caso IP, embora tenha altíssima correlação positiva com a AA, não apresentou correlação linear com as demais variáveis, exceto, como já citado, LP e AA.

Quanto às variáveis relacionadas à curva de compactação, somente D.Max apresentou correlação linear significativa, sendo com o LL, como citado anteriormente, e com a U.ISC, demonstrando que a D.Max foi menor quanto menores foram os valores de U.ISC (Tabela 7).

Em relação às variáveis do ensaio de ISC, a Exp se correlacionou positivamente com a D.ISC ( $r = 0,62$ ), o que demonstra que conforme foram maiores os valores de Exp, maiores foram os valores de D.ISC. No caso do ISC, este, também, teve relação significativa e positiva com o D.ISC, além de ter apresentado relação significativa e negativa com a U.ISC (Tabela 7).

Tabela 7. Coeficientes de correlações linear de *Spearman*, para as variáveis de interesse.

	LP	LL	IP	AA	Exp	ISC	D.ISC	U.ISC	U.Ot	D.Max
LP	<b>1,00</b>	0,22 <sup>ns</sup>	-0,70 <sup>**</sup>	-0,68 <sup>**</sup>	0,27 <sup>ns</sup>	0,18 <sup>ns</sup>	0,33 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	-0,12 <sup>ns</sup>
LL		<b>1,00</b>	0,22 <sup>ns</sup>	0,51 <sup>*</sup>	0,26 <sup>ns</sup>	-0,18 <sup>ns</sup>	-0,15 <sup>ns</sup>	-0,42 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	-0,64 <sup>**</sup>
IP			<b>1,00</b>	0,98 <sup>***</sup>	-0,07 <sup>ns</sup>	-0,17 <sup>ns</sup>	-0,40 <sup>ns</sup>	-0,28 <sup>ns</sup>	-0,01 <sup>ns</sup>	-0,27 <sup>ns</sup>
AA				<b>1,00</b>	-0,03 <sup>ns</sup>	-0,22 <sup>ns</sup>	-0,32 <sup>ns</sup>	0,12 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	-0,29 <sup>ns</sup>
Exp					<b>1,00</b>	-0,02 <sup>ns</sup>	0,62 <sup>**</sup>	-0,39 <sup>ns</sup>	-0,03 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>
ISC						<b>1,00</b>	0,61 <sup>**</sup>	-0,52 <sup>*</sup>	-0,20 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>
D.ISC							<b>1,00</b>	-0,08 <sup>***</sup>	-0,05 <sup>*</sup>	0,44 <sup>ns</sup>
U.ISC								<b>1,00</b>	-0,69 <sup>ns</sup>	-0,69 <sup>**</sup>
U.Ot									<b>1,00</b>	-0,33 <sup>ns</sup>
D.Max										<b>1,00</b>

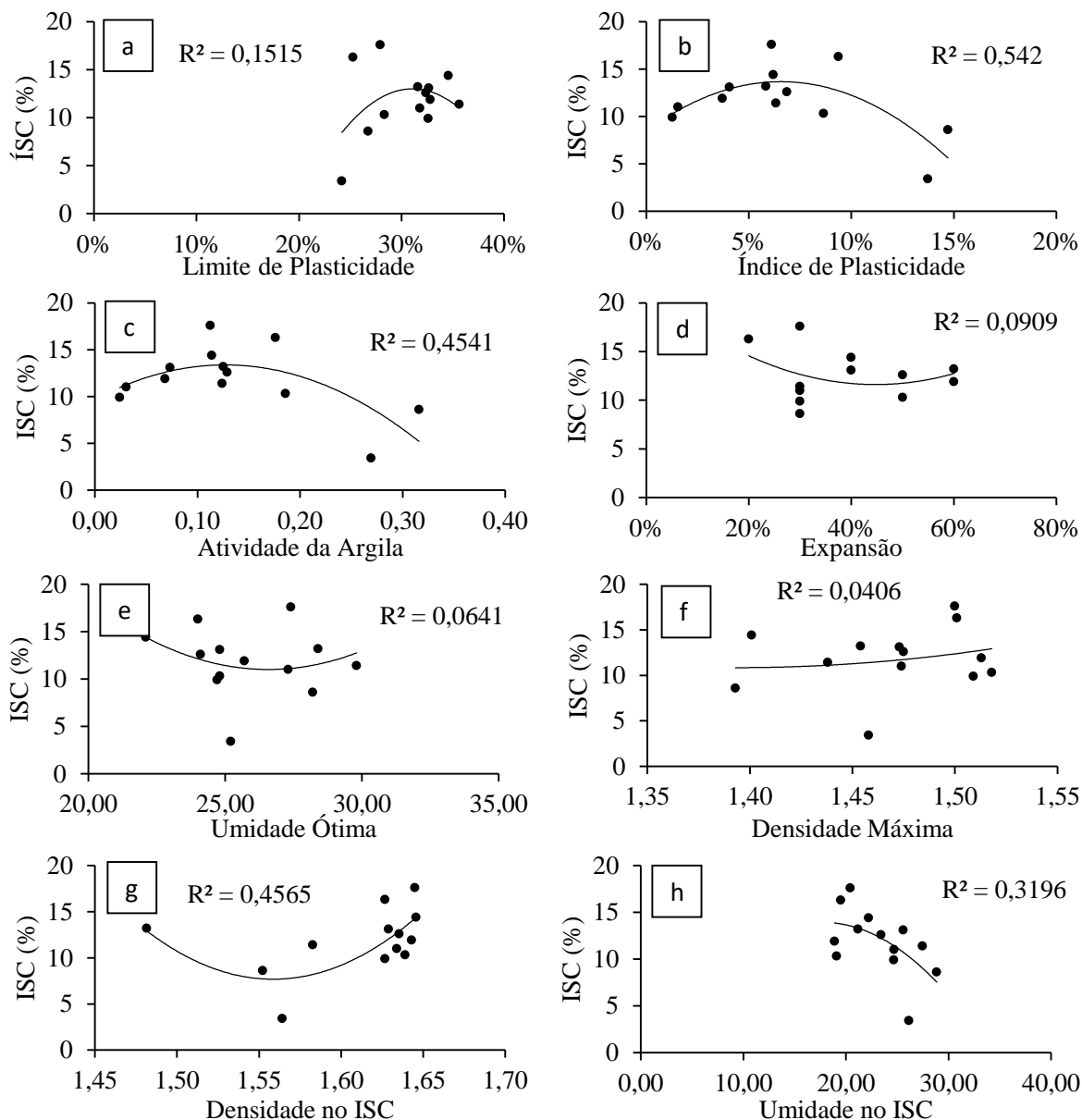
ns: não significativo; \*significativo a 10% de probabilidade; \*\*significativo a 5% de probabilidade; \*\*\*significativo a 1% de probabilidade.

LP: Limite de Plasticidade; LL: Limite de Liquidez; IP: Índice de Plasticidade; AA: Atividade da Argila; Exp: Expansão; ISC: Índice de Suporte Califórnia; D.ISC: Densidade no ISC; U.ISC: Umidade de Moldagem do ISC; U.Ot: Umidade Ótima no ensaio de Proctor normal; D.Max: Densidade máxima no ensaio de proctor normal.

Como uma das principais variáveis de interesse para uma via florestal, é o ISC, optou-se por plotar as correlações existentes entre o índice e as demais variáveis, conforme expresso na Figura 12. O Índice de Suporte Califórnia vs Limite de Plasticidade (a); Índice de Plasticidade (b); Atividade da Argila (c); Expansão (d); Umidade ótima (e); Densidade Máxima

(f); Densidade no ISC (g); Umidade no ISC (h), porém com exceção da densidade no ISC (0,61), todas as demais correlações foram não significativas.

Figura 12. Coeficientes de Correlações linear de Spearman, entre o ISC vs Limite de Plasticidade (a); Índice de Plasticidade (b); Atividade da Argila (c); Expansão (d); Umidade ótima (e); Densidade Máxima (f); Densidade no ISC (g); Umidade no ISC (h).



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018.

### 3.5 DISCUSSÃO

O solo utilizado neste estudo foi caracterizado como fino, devido ao elevado teor de silte e argila (59,2%), valor que influenciou os resultados referentes à classificação TRB, na

qual este se enquadrado no grupo A-4, por isso, este pode ser considerado inadequado como material de subleito (EMMERT; PEREIRA, 2016).

Para construção de revestimento nestas situação de solo, é recomendado o reforço do subleito, ou, a substituição do solo por materiais com melhores índices construtivos, buscando enquadrá-lo nos padrões exigidos, seja por estabilização mecânica e/ou química (SINGH; TRIVEDI; SHUKLA, 2019) ou química (EREN; FILIZ, 2009; ALI RAHGOZAR; SABERIAN; LI, 2018).

O elevado percentual de material fino (silte e argila = 59,2%) no solo induz a índices de plasticidade mais baixo do que aqueles com teores menores de argila. Fato este constatado em outras literaturas, com índice de plasticidade de 18% em solos mais grosseiros (EMMERT; PEREIRA, 2016).

Os limites de consistência do solo revelaram comportamentos diferenciados em relação às misturas de solo-resíduos. Dentre todas as misturas, o resíduo *Dregs* foi o material que aumentou o IP em maiores proporções (Figura 8A). As misturas de *Dregs* a 4, 8 e 16% aumentaram significativamente o índice de plasticidade (Tabela 6). O maior teor de *Dregs* em relação ao solo puro aumentou o IP em 275%. Índices de plasticidade superiores a 7% são considerados inadequados, e geralmente, solos que apresentam estas condições necessitam de intervenções para melhorar a capacidade de suporte dos mesmos.

Elevados incrementos no índice de plasticidade são extremamente ruins, pois, maior será a capacidade de absorção de água deste solo (AL-SWAIDANI; HAMMOUD; MEZIAB, 2016). Esse fato pode ser explicado devido alta concentração de óxidos de enxofre (SO<sub>3</sub>) e magnésio (MgO), superior aos encontrados nos *Grits*. Essas concentrações podem conferir elevada absorção de água (PETRUCCI, 1998). Isto implica que o material promove características plásticas ao solo, ou seja, quando este solo for submetido a um esforço o mesmo pode se deformar de maneira permanente, não possuindo capacidade para retornar a sua característica original após a remoção do esforço (característica indesejável para aplicação em estradas).

Para as demais misturas (*Grits* e Lama de Cal) não houve tendência clara quanto a oscilação dos valores de IP ao longo dos percentuais (Figura 5 C). De forma menos acentuada, a mistura de solo-resíduo lama de cal aumentou o IP em 50%, mantendo-o constante com os aumentos nos teores. Resultados similares foram encontrados por Eroglu et al. 2006, em que o índice de plasticidade aumentou aproximadamente 15% com aumentos nos teores de lama de cal (0, 5, 10 e 15%). Enquanto que, a mistura de *Grits* 4% foi o único que reduziu de forma significativa o IP (Tabela 6). De acordo com Pereira (2005), todos os percentuais que ele

utilizou de *Grits* resultaram em valores inferiores ao do solo natural, reduzindo-o de 33% para a faixa de 12 a 23%.

Em relação à curva de compactação, a mistura de *Grits* foi a única que revelou tendência de aumento nos valores de densidade máxima. Do ponto de vista construtivo, este é pode ser considerado um resultado promissor, visto que a resistência tem forte relação com a densidade do solo (PINTO, 2006).

Em contrapartida, tanto o *Dregs* (16%), como a Lama de Cal (16%), reduziram a densidade de 1,47 do solo puro para 1,39 e 1,45 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Sendo a mesma tendência encontrada por Molina (2004), fato que está intimamente ligado a umidade ótima das misturas, sendo inversamente proporcional à densidade.

Quanto aos resultados do Índice de Suporte Califórnia resistência (ISC), a mistura *Grits* relevou redução no índice de suporte do solo na ordem de 20% e apresentou expansão superior a 0,5% na mistura de 2%. Tal valor, não era esperado, visto que o aumento da densidade leva a aumentos no índice de suporte. Porém, isso pode ser explicado pela elevada expansão do solo que este o material proporcionou, e pelo elevado índice de plasticidade.

A mistura de lama de cal revelou incremento no índice de suporte nos menores percentuais (2% e 4%). Segundo Al-Swaidani; Hammoud; Meziab (2016), relatam que a adição de cal nos percentuais de 4 e 8% ocasionaram em um aumento de 2,89% para 55,76 e 66,02% respectivamente, estes ganhos estão atrelados a reação entre o solo e a *Pozzolana* existente no cal. Para os demais percentuais (8% e 16%) isso não ocorreu devido à redução na densidade e aumento na expansão. Já a mistura de *Dregs* reduziu drasticamente o índice de suporte nos percentuais a partir de 4%. Fato inversamente observado quanto ao índice de plasticidade e umidade ótima. De maneira geral, os resíduos utilizados em pavimentação reduzem as propriedades mecânicas (SILVA, 2010). Afirmação está já corroborada em pesquisas anteriores pelos autores Petrucci, 1998; Mehta; Monteiro, 2008.

De acordo com os resultados da correlação de Spearman (Tabela 7) a variável ISC revelou tendências crescentes com o limite de plasticidade (0,17), densidade máxima (0,05) e densidade no ISC (0,61). Porém, apenas a correlação entre ISC e densidade no ISC foi significativa ( $p < 0,05$ ). Entretanto, a variável ISC revelou tendências decrescentes com as variáveis: índice de plasticidade (-0,17), atividade da argila (-0,22), expansão (-0,02), umidade no ISC (-0,52) e umidade ótima (-0,20). Sendo apenas a correlação com a umidade no ISC significativa a 10% de probabilidade.

### 3.6 CONCLUSÕES

O solo com adição de *Dregs* aumentou o índice de plasticidade do solo, tornando difícil a sua utilização em termos construtivos de uma via florestal, apesar de o mesmo ter apresentado um incremento nos Índices de Suporte Califórnia, para certos percentuais.

Já o uso de *Grits*, apresentou tendência de redução no índice de plasticidade nos três menores percentuais utilizados. Apresentou um incremento na densidade do solo, apesar de não refletir no índices de Índices de Suporte Califórnia.

Quanto a mistura de Lama de Cal, revelou incremento no índice de suporte nos menores percentuais (2 e 4%), não elevou os índices de plasticidade ao longo de todas as misturas, porém, apresentou expansão superior a 0,5%, em sua maior dosagem em relação ao solo puro.

De modo geral, vale ressaltar que a mistura que apresentou as melhores características, a serem aplicada como reforço de um subleito, foram as misturas de *Dregs* nos menores percentuais, e a mistura de Lama de cal, por apresentar as menores oscilações ao longo de suas misturas, revelando ganhos no índice de suporte.

### 3.7 REFERÊNCIAS

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.

ALVARES, C. A. et al. **Koppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER ME 051/94. Solos: **Solos – análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1994a. 13 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER ME 122/94. **Solos: determinação do limite de liquidez método de referência e método expedito**. Rio de Janeiro, 1994b. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER ME 082/94. **Solos: determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1994c. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER ME 129/94. Solos: **Compactação utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 1994d. 8 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER ME 049/94. Solos: **Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 1994e. 15 p.

DU, Y. J. et al. Field evaluation of soft high way subgrade soil stabilized with calcium carbide residue. **Soils and Foundations**, Japão, v. 56, n. 2, p. 301-314, 2016.

EMMERT, F.; PEREIRA, R. S. Caracterização geotécnica e classificação de solos para estradas florestais: Estudo de caso. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 601-613, abr.-jun., 2016.

EREN, S.; FILIZ, M. Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolid system used as an alternative admixture matter in Isparta Dandere Material. **Construction and Building materials**, Turkey, n. 23, p. 2473-2480, 2009.

EROGLU, H. et al., Soil stabilization of forest road sub-base using lime mud wast from de chiminalrecoveryprocess in alkaline pulp mil. **Journal of Applied Sciences**. Turkey, n. 6, p. 1199-1203, 2006.

ISTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. BDMEP Dados Históricos. 2015. Disponível em:< <http://www.inmet.gov.br/portal/>> . Acesso em: 03 dez. 2018.

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

MATSUMURA, S.; TATSUOKA, F. Effect of compaction conditions and fines content on cyclic undrained strength of saturated soils. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, Reino Unido, v. 112, p. 152-161, maio 2018.

MOUSAVI, S. E.; KARAMVAND, A. Assessment of strength development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand. **Journal of Traffic and Transportation Engineering, (English Edition) JTTE**, [S.l.], v. 4, n. 4, p. 412-421, ago. 2017.

PATIÑOL, O.A. SENAI-CETCEP – **Centro Nacional de Tecnologia em Celulose e Papel**. e-mail: cetcep@teb.convoy.com.br (1998).

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

RAJKAMAL, K. et al. Performance Evaluation of Gravel Road Sections Sealed with Surface Dressing. **Transportation Research Procedia**, Netherlands, v. 17, p. 81-89, 2016.

SINGH, M.; TRIVEDI, A.; SHUKLA, S. K.; Strength enhancement of the subgrade soil of unpaved road with geosynthetic reinforcement layers. **Transportation Geotechnics**. v 19. P. 54-60. 2019.

WOLFF, E. **O uso do lodo de estação de tratamento de água e resíduos da indústria de celulose (dregs, grits e lama de cal) na produção de cerâmica vermelha**. 2008. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

ZHANG, T.; CAI, G.; LIU, S. Application of lignin-based by-product stabilized silty soil in highway subgrade: A field investigation. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 142, p. 4243-4257, 2017.



## 4 ESTUDO II. DESEMPENHO DE DIFERENTES ALTERNATIVAS PARA ESTABILIZAÇÃO DE CAMADAS DE PAVIMENTOS DESTINADOS À CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS FLORESTAIS

### 4.1 RESUMO

Estradas florestais são caracterizadas pelo tráfego de baixo volume. Entretanto, nas restritas ocasiões de tráfego, estes são efetuados em condições de elevada carga. Ainda assim, pouca atenção tem sido atribuída a este tipo de construção. Técnicas de estabilização geralmente são requisitadas, mas materiais granulares naturais têm sido subutilizados. O objetivo deste trabalho foi avaliar alternativas para estabilização química e mecânica de solos destinado a construção de camadas de pavimento de estradas florestais, e avaliar o desempenho de diferentes camadas de pavimento em estradas florestais. O experimento foi conduzido no município de São José do Cerrito, em um trecho localizado na área destinada a produção de *Pinus taeda* L. para celulose. Foram avaliados dois tipos de solos (Solo Padrão e Solo Jazida), um estabilizante químico (cimento) nas proporções de 2, 4, 8 e 16% em relação ao peso do solo padrão seco ao ar, dois estabilizantes mecânicos (Cascalho Padrão e Cascalho Alternativo) e 12 misturas entre solos e cascalhos nas proporções de 30%, 50% e 70%. Para cada mistura foi obtida quantidade suficiente de material para realização de análise granulométrica (coeficientes de uniformidade e curvatura), ensaios de compactação de *Proctor* e Índice de Suporte Califórnia (ISC), e avaliação do desempenho pelo *Unsurface Road Condition Index* (URCI). Os solos foram caracterizados como siltosos, revelando características de ruim a mal para uso rodoviário. O ensaio de *Proctor* revelou que a medida que aumenta o percentual de cascalho, a umidade ótima reduz e a densidade máxima aumenta. Quanto ao ISC, o Solo Padrão aumentou o índice para ambos os cascalhos, à medida que aumentava o percentual de material granular, tendência não observada para o Solo Jazida. Quanto ao trecho experimental foram construídos nove trechos/seguimento com 30 metros de comprimento por 5 metros de largura cada. Alguns seguindo metodologias de dimensionamento, outros aplicando espessuras padrões utilizadas pela empresa (12 cm de espessura). Após a execução dos trechos, iniciou-se o tráfego com veículos do tipo Bitrem de sete eixos, de peso bruto total combinado de 57,0 toneladas. Foram realizadas quatro avaliações após 0, 60, 150 e 200 passadas do veículo, segundo procedimento denominado EATON (defeitos-tipo referentes a seção transversal, trilhos de rodas e perda de agregados). Os trechos que revelaram desempenho satisfatório, pela URCI, foram os denominados de misturas 2 (camada de revestimento com mix de Cascalho padrão 85% + Solo jazida 15%), 3 (Camada de revestimento com mix de Cascalho padrão 80% + Pó de pedra (pedrisco) 20%), 8 (Camada de revestimento com mix de Cascalho padrão 70% + Solo jazida 30% e melhoria no subleito com aplicação de 2% de Cimento *Portland*) e 9 (Camada de revestimento com Cascalho padrão 100% e melhoria no subleito com aplicação de 2% de Cimento *Portland*), porém, as misturas 2 e 3 não seguiram metodologia de dimensionamento. As misturas 8 e 9 foram dimensionadas, e apresentaram bom desempenho devido a melhoria proporcionada pelo uso de cimento, aumentando a sua capacidade de suporte.

**Palavras-chave:** Estabilização química e mecânica, ISC, URCI.

## 4.2 INTRODUÇÃO

O tratamento do solo é uma preocupação essencial para engenheiros que trabalham com construção de estradas (MORAFA et al., 2017; DUC; KENNEDY, 2018). Esta preocupação é estendida quando se tratam de estradas de baixo volume de tráfego, caracterizadas por uma média anual diária de 400 (ou menos) a 1000 veículos por dia (KELLER, 2016).

Estatísticas revelam que mundialmente as estradas de baixo volume de tráfego compõem cerca de 30 milhões de quilômetros, mas que estas não recebem atenção apropriada (FAIZ, 2012). Em nível nacional, as estradas não pavimentadas representam 78,6% (1.364.511 km) da malha rodoviária brasileira (CNT, 2018).

Já as estradas florestais que caracterizam-se pelo baixo volume de tráfego (menos de 400 veículos por dia), e principalmente ocorrendo com maior intensidade em períodos de colheita e transporte de madeira, e quase em sua totalidade apresentando velocidade de transporte inferior aos 80 km/h (EMMERT; PEREIRA, 2016). A maioria das estradas florestais são constituídas por camadas, quase indistintas, sendo o próprio subleito ou solo natural, reforço que atua como sub-base e uma camada melhorada com material granular, atuando como revestimento (PEREIRA et al., 2017).

A principal problemática na construção deste tipo de estrada reside na utilização do solo local, que, em muitos casos, pode ser pouco resistente e compressível do ponto de vista geotécnico (TRINDADE et al., 2008), carecendo, desta forma, de melhorias, do solo que visam alterar os parâmetros mecânicos das camadas de subleito, consolidação e compactação do solo e melhoria de resistência ao cisalhamento (CHOOBBASTI; KUTANAEI, 2017).

Um dos métodos mais antigos para a estabilização do solo, baseia-se na correção granulométrica do solo, e a partir disto possibilita uma melhor compactação, esse método de correção granulométrica também conhecida como estabilização mecânica (KELLER, 2016). Tecnicamente, este tipo de estabilização consiste em melhorar a gradação de um solo bruto, misturando um material grosso e / ou fino (geralmente de 10 a 50%) com o objetivo de obter uma massa homogênea quando compactada (O'FLAHERTY et al., 2002).

Dentre os materiais que têm sido utilizado com este propósito podem ser citados: polietileno de juta de alta densidade (BASU et al., 2009), vidro esmagado reciclado (DISFANI et al., 2012), materiais geossintéticos (HAZIRBABA; GULLU, 2010; KELLER, 2016; YANG et al. 2012) e uso de materiais granulares como misturas naturais de solo e cascalho (RAJKAMAL et al., 2016; FALLA et al., 2017; PEREIRA et al., 2017). Devido à escassez de brita, a viabilidade de usar materiais granulares disponíveis localmente como material de

pavimentação, está sendo explorada na maior parte do mundo principalmente misturas alternativas, sejam elas químicas ou não, de diversas origens (BISWAL; SAHOO; DASH, 2016). Essas buscas por alternativas, vão em busca de materiais duradouros, e viáveis para a aplicação, uma vez que um pavimento de estrada, pode ser considerado um sistema estrutural projetado, por um período de tempo predeterminado, para suportar os efeitos combinados do tráfego e do ambiente (RASUL; TOCA; GHATAORA, 2016). Para isso o estudo de dimensionamento de pavimentos envolve primeiramente a caracterização geotécnica dos solos e posteriormente estudos de estabilização, garantindo maior resistência a futura estrada a ser construída (PAPANICOLAOU et al., 2015).

Os pavimentos são projetados para distribuir tensões impostas pelo tráfego ao subleito, sendo que as condições do subleito têm uma influência significativa na escolha da espessura da estrutura do pavimento e da forma como é projetada (KUTTAH; ARVIDSSON, 2017; JONES et al., 2010).

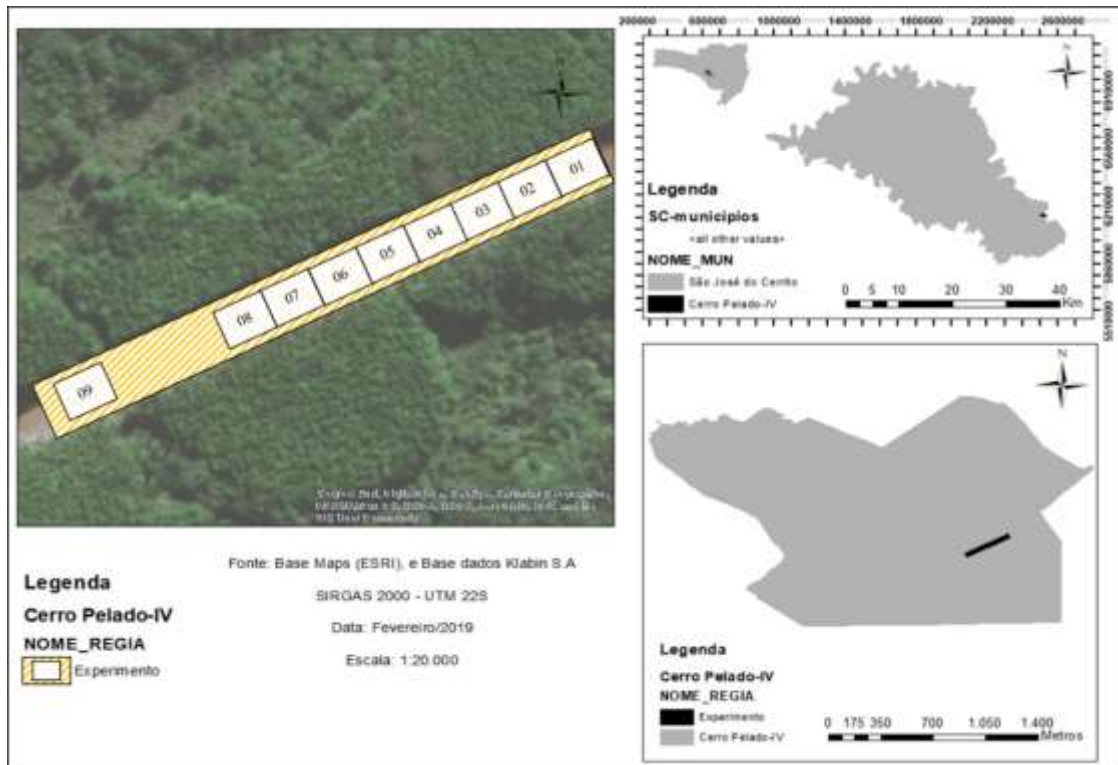
O objetivo deste estudo foi avaliar alternativas para estabilização mecânica e química de solos destinados a construção de camadas de pavimento de estradas florestais, e verificar o desempenho destas em aplicação de trecho experimental.

## 4.3 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.3.1 Caracterização da área de estudo

Os solos avaliados e o trecho experimental do presente estudo localizam-se em uma fazenda destinada à produção de pinus para celulose, denominada Cerro Pelado-IV, pertencente à empresa Klabin S.A, localizada no município de São José do Cerrito, Planalto Sul do Estado Santa Catarina, Brasil (Figura 13).

Figura 13. Croqui de localização da área em estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

O solo da região é classificado como Neossolo, e o clima é do tipo Cfb, segundo a classificação de Köppen, com verão temperado e inverno seco e com temperatura média anual entre 14 e 16 °C. A precipitação pluviométrica média anual varia de 1.600 mm e 1.900 mm e se apresenta bem distribuída ao longo de todos os meses, sem período de estiagem específico (ALVARES et al., 2014). Segundo dados do INMET (2018), nos últimos dez anos a precipitação total anual variou de 1.899 a 2.989 mm para a região de estudo, com média de 2.338 mm.

#### 4.3.2 Solos, materiais estabilizantes e alternativas avaliadas

Na área de estudo, foram coletados dois tipos de solo a partir de diferentes origens. O primeiro, denominado de “Solo Padrão” (SP), foi coletado a partir de um trecho de estrada florestal de uso primário, conforme mencionado no estudo I. Já o segundo solo, denominado de “Solo Jazida (SJ)”, foi coletado por meio do decapeamento de uma jazida de basalto existente no interior da mesma fazenda, cujas coordenadas centrais são 27°42’02” S e 50°25’29” W.

Além dos dois tipos de solo, também, foram avaliados três tipos de material rochoso para estabilização mecânica. O Cascalho Padrão (CP) e o Pedrisco Basáltico (PB) provenientes da jazida de basalto pertencente a empresa Klabin S.A, na qual, também, foi coletado o Solo Jazida. Já o Cascalho Alternativo (CA), em semelhança, era de origem basáltica, porém, provinha de empresa privada do mercado regional.

Visando-se avaliar mais uma possível alternativa de estudo, utilizou-se para estabilização química do solo, Cimento do tipo Portland CP II-Z-32, cujo, também, provinha de empresa privada do mercado regional.

Após a obtenção, todos os materiais (solos, materiais rochosos e cimento) foram armazenados em sacos plásticos ou de papel para permitir o transporte até as dependências do Laboratório de Operações e Estradas Florestais (LOPEF), localizado no Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV), da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lages, SC. Neste local, as amostras foram secas ao ar e os solos, posteriormente, foram destorroados e peneirados em peneira nº 4 (4,76 mm).

Posteriormente, foram preparadas 19 misturas entre os solos, materiais rochosos e cimento com intuito de se avaliar diferentes alternativas de estabilização, conforme a Tabela 8.

Tabela 8. Alternativas avaliadas e proporção de mistura das amostras.

<b>Alternativa (sigla)</b>	<b>Material (%)</b>	
	Solo Padrão (SP)	Cascalho Padrão (CP)
SP30%+CP70%	30	70
SP50%+CP50%	50	50
SP70%+CP30%	70	30
	Solo Padrão (SP)	Cascalho Alternativo (CA)
SP30%+CA70%	30	70
SP50%+CA50%	50	50
SP70%+CA30%	70	30
	Solo Padrão (SP)	Cimento Portland CII (CM)
SP98%+CM02%	98	02
SP96%+CM04%	96	04
SP92%+CM08%	92	08
SP84%+CM16%	84	16
	Solo Jazida (SJ)	Cascalho Padrão (CP)
SJ15%+CP85%	15	85
SJ30%+CP70%	30	70
SJ50%+CP50%	50	50
SJ70%+CP30%	70	30
	Solo Jazida (SJ)	Cascalho Alternativo (CA)
SJ30%+CA70%	30	70
SJ50%+CA50%	50	50
SJ70%+CA30%	70	30
	Cascalho Padrão (CP)	Pedrisco Basáltico (PB)
CP80%+PB20%	80	20

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

O Solo Padrão (SP), o Solo Jazida (SJ) e os materiais rochosos foram avaliados puros (isentos de mistura) como forma de controle no estudo. Ressalta-se que não foi considerado tempo de cura para as misturas com Cimento Portland, sendo os ensaios realizados imediatamente após a preparação das mesmas.

### 4.3.3 Ensaios de laboratório e determinações

#### 4.3.3.1 Análise e curva granulométrica, classificação dos solos

A análise granulométrica foi realizada para os solos e materiais rochosos puros (exceto PB), além de todas as misturas (exceto para a mistura contendo o percentual de 85% de CP e 15% de SJ, e excedendo-se, também, aquelas com Cimento Portland). A metodologia empregada seguiu o proposto pelo DNER – ME 051 (DNER, 1994a). Para separação das partículas sólidas mais grossas (a partir da areia fina, acima de 0,05 mm) por peneiramento, foram analisadas amostras de 1 kg em três repetições, totalizando 42 repetições e 14 tratamentos.

Com os valores da análise granulométrica, foi possível plotar a curva granulométrica de cada tratamento, podendo, então, serem determinados os Coeficientes de Uniformidade (Cu) e de Curvatura (Cc), conforme as Equações 2 e 3.

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

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad \text{Equação 3}$$

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.

Valores de Cu inferiores a 5 são classificados como “uniforme”, enquanto que valores de Cu superiores a 15 são classificados como “desuniforme”, e entre o intervalo de 5 a 15 são como “mediamente uniforme”. 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).

Além disso, por meio dos valores da análise granulométrica e junto aos valores de limites de consistência, também, foi realizada a classificação dos tratamentos quanto a USCS (*Unified Soil Classification System*) e TRB (*Transportation Research Board*).

Por fim, ainda por meio dos valores de granulometria, as amostras de materiais rochosos puros (exceção PB) e as misturas de solo-cascalho, foram analisadas e classificadas conforme as Faixas Granulométricas propostas pelo DNIT.

#### 4.3.3.2 Limites de consistência e atividade da argila

Para determinação dos limites de consistência dos solos puros e misturas de solo-cimento, 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). Para os ensaios foram utilizadas quatro repetições, sendo o índice de plasticidade (IP) calculado pela diferença entre os valores de LL e o LP ( $IP = LL - LP$ ) (PINTO, 2006).

A atividade da argila (AA) do solos puros e misturas de solos-cimento foi determinada de acordo com o método proposto por Skempton, expresso pela razão entre o IP e o percentual de argila presente no solo, podendo ser classificada conforme sua atividade inativo ( $<0,75$ ), normal ( $0,75$  a  $1,25$ ) e Ativa ( $>1,25$ ) (PINTO, 2006).

#### 4.3.3.3 Parâmetros da curva de compactação do solo

Os parâmetros da curva de compactação, densidade máxima do solo (D.Max) e a umidade ótima de compactação (U.Ot), dos solos puros e misturas foram obtidos por meio do Ensaio de Proctor em Ensaio em Energia Normal, o qual foi realizado de acordo com o método DNER-ME 129 (DNER, 1994 d). 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.

#### 4.3.3.4 Índice de Suporte Califórnia e Expansão ISC

O Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão ISC dos solos puros e misturas foram obtidos por conforme método do DNER-ME 049 (DNER, 1994 e). No ensaio empregou-se a energia de compactação intermediária, sendo realizado em três pontos de umidades: um ponto na umidade ótima de compactação; um abaixo; e outro acima; conforme obtido no ensaio de *Proctor* normal.

### 4.3.4 Construção e avaliação de trechos experimentais

#### 4.3.4.1 Tratamentos avaliados

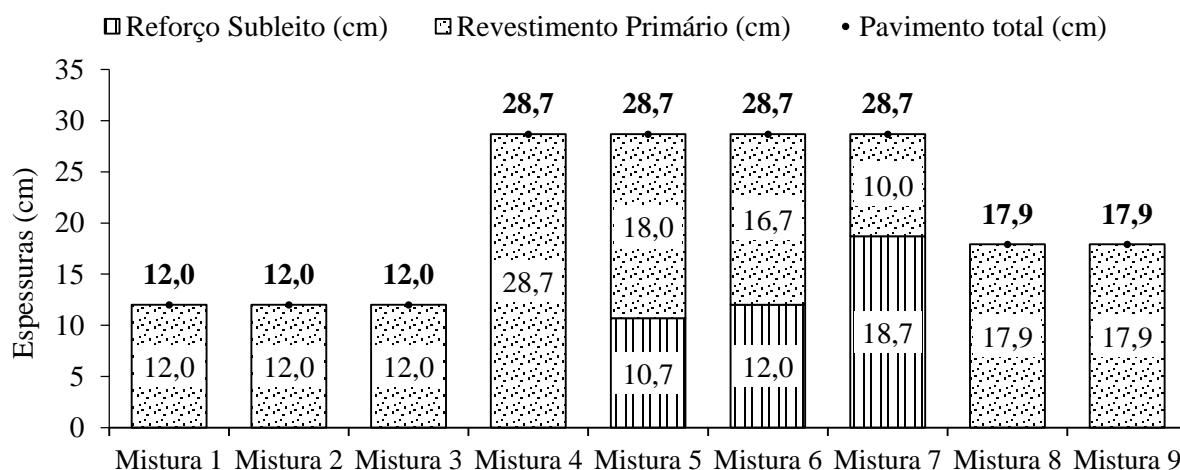
Diante dos resultados das análises dos ensaios laboratórios e conforme os recursos disponíveis, foram definidas nove diferentes combinações (tratamentos) para confecção e execução de trechos experimentais, cujos foram construídos com 30 metros de comprimento por 5 metros de largura ao longo do trecho de estrada primária dentro da área de estudo. Avaliou-se os seguintes tratamentos com respectiva composição:

- 1) Tratamento 1: Subleito compactado e camada de revestimento primário com 12,0 cm de espessura composta por 100% de Cascalho Padrão;
- 2) Tratamento 2: Subleito compactado e camada de revestimento primário com 12,0 cm de espessura composta por 85% de Cascalho Padrão e 15% de Solo Jazida;
- 3) Tratamento 3: Subleito compactado e camada de revestimento primário com 12,0 cm de espessura composta por 80% de Cascalho Padrão e 20% de Pedrisco Basáltico;
- 4) Tratamento 4: Subleito compactado, reforço do subleito com sub-base com 18,7 cm de espessura composta por 100% de Cascalho Padrão em forma de rachão (sem passar por processo de britagem, com dimensões superiores a 2,5”) e camada de revestimento primário com 10,0 cm de espessura composta por 100% de Cascalho Padrão;
- 5) Tratamento 5: Subleito compactado, reforço do sub-leito com 10,7 cm de espessura composta por 50% de Cascalho Padrão e 50% de Solo Jazida, camada de revestimento primário com 18 cm de espessura composta por 100% de Cascalho Padrão.
- 6) Tratamento 6: Subleito compactado, reforço do subleito com sub-base com 12,0 cm de espessura composta por 70% de Cascalho Padrão e 30% de Solo Jazida e camada de revestimento primário com 16,7 cm de espessura composta por 100% de Cascalho Padrão;
- 7) Tratamento 7: Subleito compactado, reforço do subleito com sub-base com 18,7 cm de espessura composta por 50% de Cascalho Padrão e 50% de Solo Jazida e camada de revestimento primário com 10,0 cm de espessura composta com 100% de Cascalho Padrão;
- 8) Tratamento 8: Subleito compactado e estabilizado por meio de aplicação de 2% de Cimento *Portland* e camada de revestimento primário com 17,9 cm de espessura composta por 70% de Cascalho Padrão e 30% de Solo Jazida;

- 9) Tratamento 9: Subleito compactado e estabilizado por meio de aplicação de 2% de Cimento *Portland* e camada de revestimento primário com 17,9 cm de espessura composta por 100% de Cascalho Padrão.

A espessura do pavimento dos tratamentos 1, 2, 3 e 5 foi dimensionado conforme o padrão adotado pela empresa parceira do estudo (Figura 14). Enquanto a espessura do pavimento dos demais tratamentos, foi dimensionado conforme a metodologia do DNIT (2006) adaptada por Machado et al. (2013), esperando-se um número de passadas do eixo-padrão de 8,2 t (N) equivalente à 81.122.

Figura 14. Misturas e suas respectivas camadas em centímetro.

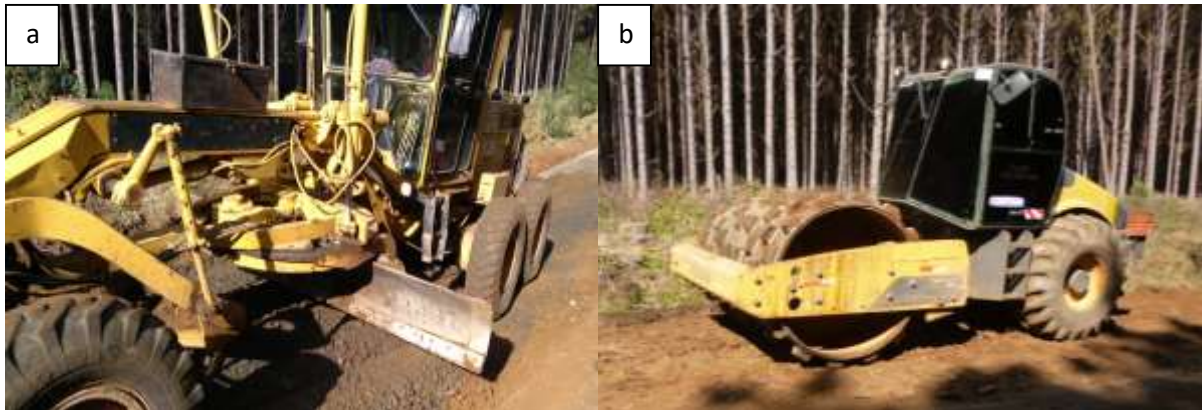


Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

#### 4.3.4.2 Processos construtivos

O processo construtivo consistiu basicamente de três fases distintas, inicialmente sendo realizado a regularização do subleito, cuja etapa envolveu as atividades de conformação da via, por meio de “raspagem e abaulamento” com motoniveladora e, posterior, compactação com rolo vibratório do tipo “pé-de-carneiro” de 11 toneladas (Figura 15 - a, b respectivamente).

Figura 15. Demonstração da motoniveladora (a) e rolo compactador, pé-de-carneiro (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Durante a etapa de compactação foi controlada a umidade do solo, e admitindo-se variações de -2% a +2% na umidade ótima de compactação. Atividade está que foi realizada pelo método da frigideira, que consistiu em secar amostras de solo com o auxílio de fogareiro e pela razão entre massa úmida e massa seca foi possível determinar o teor de água existente (Figura 16 a). Quanto a compactação, o aceitável foi de no mínimo 100% de compactação em relação a energia do ensaio de *Proctor*. Para a verificação coletou-se amostras no trecho de execução da obra, com o auxílio de anéis metálicos com dimensões e massa conhecida, e pela relação entre volume e área dos anéis, determinou-se a densidade em que o solo se encontrava (Figura 16 b).

Figura 16. Controle de umidade pelo método da frigideira, e secagem com fogareiro (a) e coleta de amostras de anéis metálicos no solo para o controle de compactação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Em seguida, procedeu-se com a fase de construção de reforço de subleito, esta fase foi realizada apenas para alguns tratamentos (4, 6 e 7). As misturas de solo-cascalho empregadas nestes tratamentos foram preparadas com o auxílio de uma retroescavadeira (Figura 17 a) e transportada até o trecho experimental com um caminhão basculante (Figura 17 b).

Figura 17. Demonstração da retroescavadeira (a) realizando o carregamento das misturas, e caminhão basculante (b) realizando a descarga das misturas no trecho experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Já para o caso dos tratamentos 8 e 9, onde o subleito foi estabilizado quimicamente com cimento (Figura 18 a), primeiramente, este foi escarificado com uso da motoniveladora e, em seguida, gradeado com uma grade de discos tracionada por um trator agrícola (Figura 18 b), para realizar o espalhamento e a homogeneização do material, para posterior compactação.

Figura 18. Aplicação de cimento no solo (a) e homogeneização do cimento com o solo, por meio de gradagem (b).



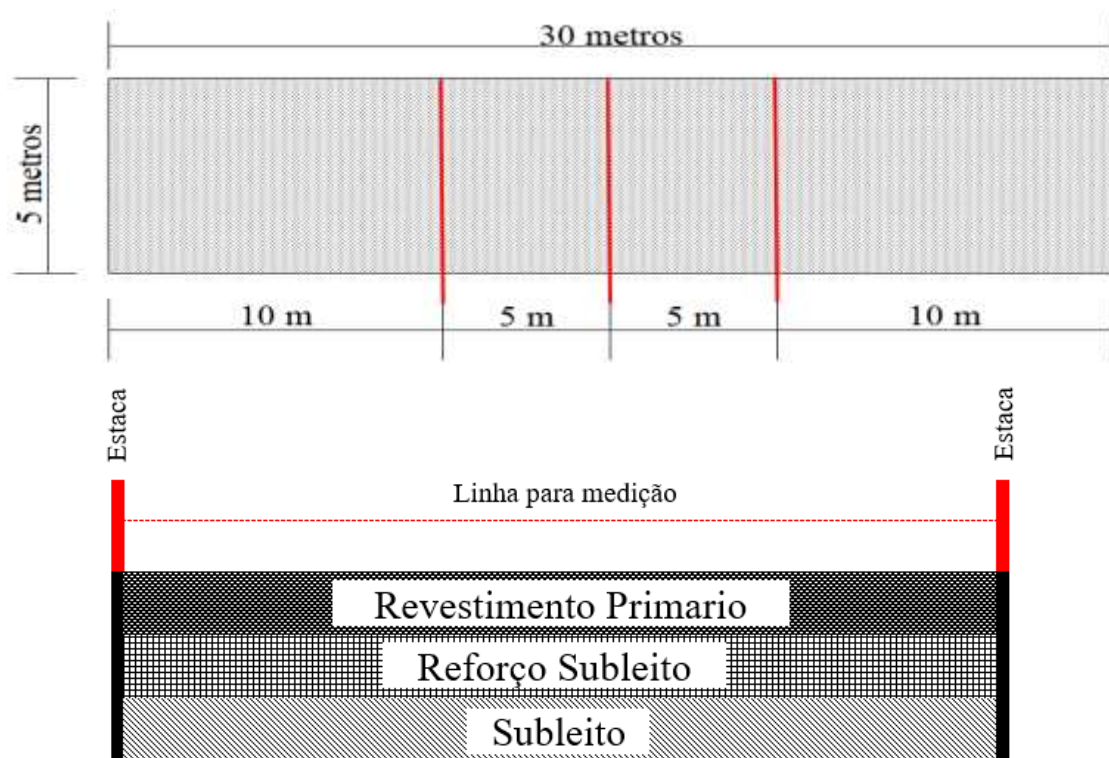
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

A construção das camadas de revestimento primário seguiu mesmo o procedimento adotada para a construção das camadas de reforço do subleito, ressaltando que houve controle de compactação, sendo empregado rolo compactador do tipo “liso”.

#### 4.3.4.3 Avaliação do desempenho dos trechos experimentais

Para a avaliação dos trechos experimentais, procedeu-se, inicialmente demarcando três pontos (repetições) nas quais foram quantificados e analisados os defeitos-tipo em decorrência de simulações de tráfego, as quais demonstradas em linhas de vermelho no esquema da Figura 19.

Figura 19. Demonstrativo de um seguimento de 30 metros, que caracteriza um dos trechos utilizados no referido experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Nesses pontos, foram alocadas estacas de fibra e vidro nos limites laterais da via, para posterior amarração de uma linha que ficasse transposta sobre a pista de rolamento, auxiliando assim na definição do perfil da via, por meio da mensuração da altura entre o revestimento e a linha. A linha sempre foi alocada no mesmo local para evitar erros de medição.

Em seguida com o auxílio de um caminhão pipa (Figura 20) com capacidade para 12.000 litros de água, foi realizado o umedecimento (umectação) da via, de forma a simular a precipitação (chuva). Foram coletadas amostras de solo para a determinação da umidade de cada uma das camadas do pavimento para os nove seguimentos do trecho experimental. Em média geral o revestimento apresentou umidade de 1,87%; o reforço com umidade de 6,75% e sub-leito com umidade de 24,8%.

Figura 20. Caminhão pipa utilizado para o transporte aplicação de água sobre a via, com o intuito de simular a precipitação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Procedeu-se, então, com as simulações de tráfego com veículos do tipo Bitrem, cujos eram compostos por cavalo mecânico e dois semi-reboques, possuindo um eixo dianteiro simples e três eixos em tandem traseiros duplos, tendo cada composição veicular com peso bruto total combinado de 57,0 toneladas (Figura 21).

Figura 21. Composição veicular do tipo Bitrem, utilizada para trafegar a via florestal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os veículos trafegaram em uma velocidade média de 17 km/h, sempre no mesmo sentido de circulação (active). Avaliações foram realizadas após 0, 60, 150 e 200 passadas totais dos veículos. Ressalta-se que a leitura inicial antes de iniciar a atividade de tráfego dos veículos teve o objetivo de servir como ponto testemunha para as leituras seguintes e, assim, permitir identificar os pontos de alteração da pista de rolamento dos trechos.

O método de avaliação dos trechos experimentais adotado seguiu os procedimentos de EATON, por meio da determinação do *Unsurface Road Condition Index (URCI)*, o qual é determinado através da quantificação e análise de defeitos-tipo referentes a: i) seção transversal; ii) trilhos de rodas; e iii) perda de agregados (EATON, et al., 1987).

As alterações ocorridas na pista de rolamento devido a ação do tráfego em cada trecho dos tratamentos dentro de cada defeito-tipo, foram hierarquizadas em níveis de severidade, de acordo com o impacto na trafegabilidade da via. Os níveis de severidade foram classificados em: *não se aplica; baixa; média e alta severidade*.

Para nível de severidade foi atribuído um peso, sendo o nível “baixo” equivalente a 2 pontos; “médio” a 4 pontos e “alto” a 15 pontos. Cada defeito-tipo foi avaliado separadamente para determinar as suas densidades por unidade de área (medida objetiva ou quantitativa) e nível de severidade, para, então, se possível determinar o valor-dedução, cujo é obtido por meio de gráficos (nomogramas) específicos (Figuras 22 a 24).

Figura 22. Gráfico para Valor Dedução para o defeito Seção transversal (a) e trilhos de roda (b).

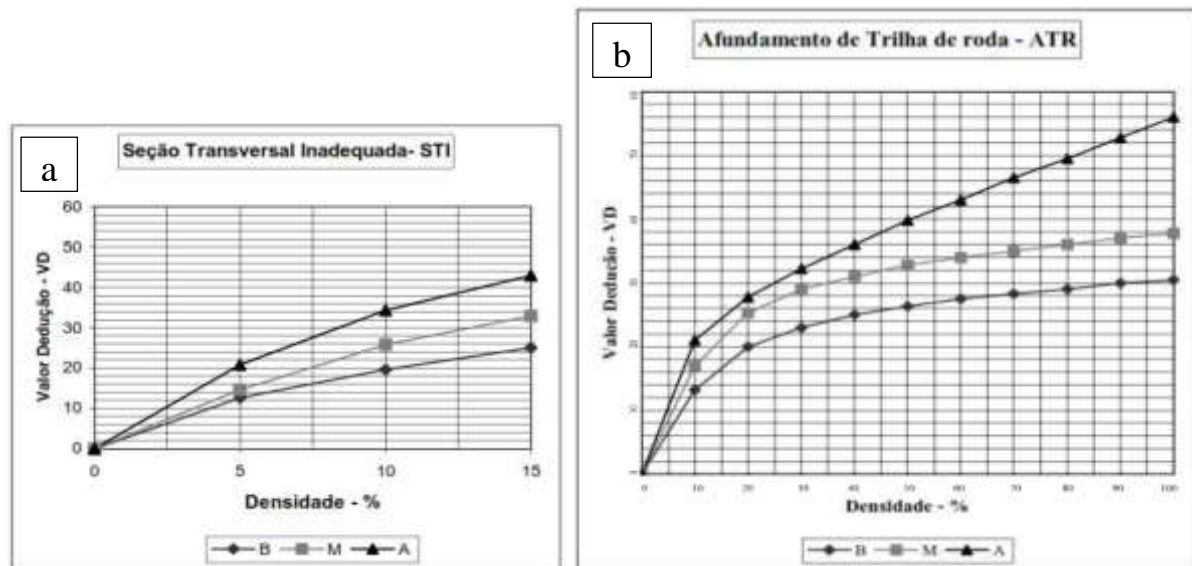
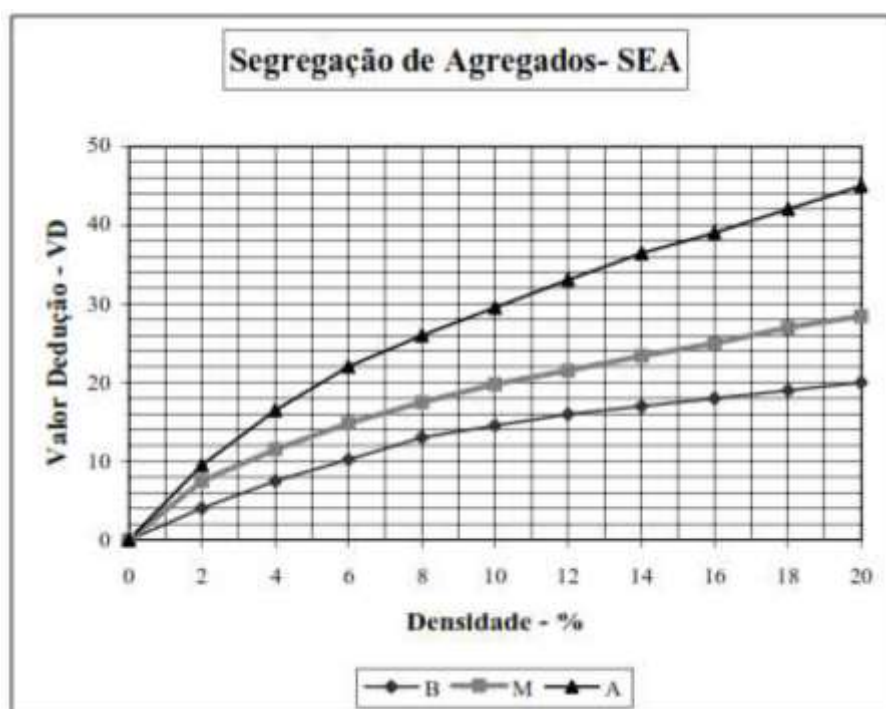


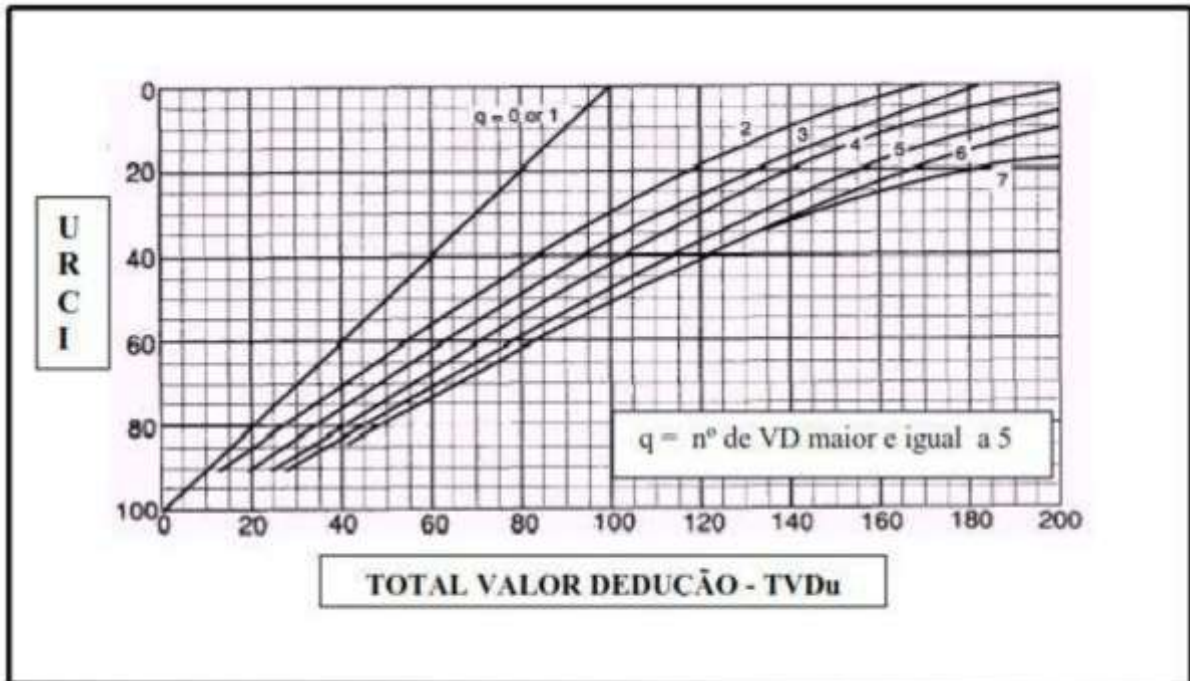
Figura 23. Gráfico para Valor Dedução para o defeito Segregação de Agregados.



Em seguida, realiza-se a avaliação da severidade dos defeitos-tipo, conforme segue:

- Seção transversal: Superfície plana (baixa); superfície em forma de bacia (média); superfície com grandes depressões (alta);
- Trilhos de Rodas: É a depressão longitudinal que ocorre no mesmo sentido do tráfego. Com profundidade <2,5 cm (Baixa); 2,5 a 7,5 cm (Média) e >7,5 cm (Alta);
- Perda de agregados: Segregação do agregado para as laterais e para o centro da via. Com bermas <5,0 cm de altura (baixa); 5,0 a 10,0 cm (média) e >10,0 cm (Alta).

Figura 24. Gráfico para determinação do URCI.



URCI	0 – 10	10 – 25	25 – 40	40 – 55	55 – 70	70 – 85	85 – 100
	Péssima	Muito Pobre	Pobre	Regular	Boa	Muito Boa	Excelente

#### 4.3.5 Análise dos dados

Medidas descritivas tais como média e desvio padrão foram realizadas para as variáveis trilho de roda, perda de agregado e URCI. Para a variável área de solo movimentada e URCI, foram testadas a normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variância (Levene) a 5% de probabilidade, e Análise de variância para os efeitos mistura, número de passadas e sua interação. Para as misturas, suas respectivas médias foram testadas por Dunnett, possibilitando a comparação com uma mistura testemunha. Considerando a variável URCI, foi utilizado Modelos lineares generalizados mistos, com uso do procedimento PROC GLIMMIX do SAS.

## 4.4 RESULTADOS

### 4.4.1 Caracterização dos solos

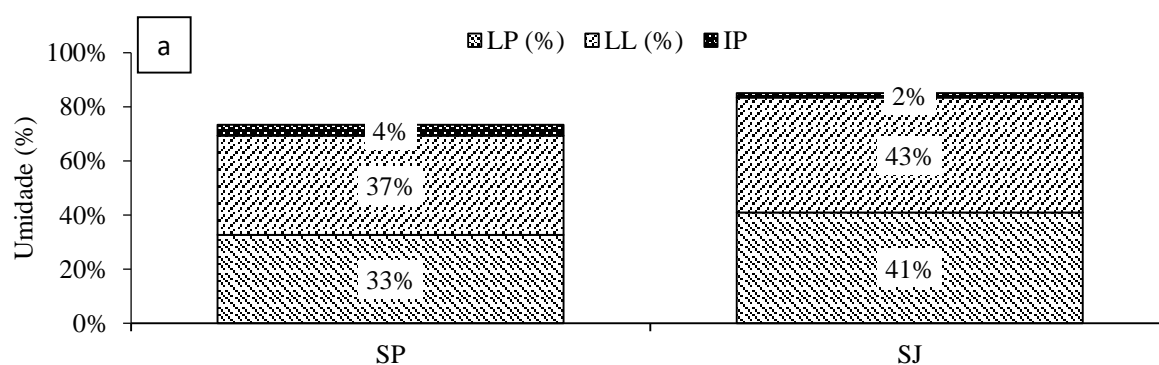
O Solo Padrão e Solo Jazida se enquadraram, conforme a USCS, na classe relativa a solos com baixo índice de consistência (L), porém, o SP com características voltadas para material fino (M) e o SJ com características de solo orgânico (O) (Tabela 9), quanto aos limites de consistência dos solos (Figura 25a), o solo padrão apresenta um índices maiores de IP, 2% contra 5%. Quando observa-se as misturas de solo Padrão com o acréscimo de estabilizante de cimento (Figura 25b).

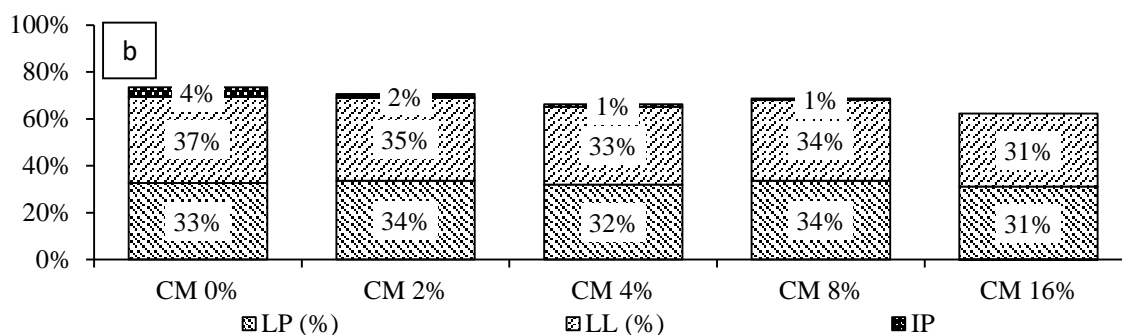
Tabela 9. Classificações dos solos padrão e jazida conforme os critérios descritos em USCS e TRB.

Solo	USCS	TRB
Padrão (SP)	ML	A4
Jazida (SJ)	OL	A5

Fonte. Elaborado pelo autor, 2018.

Figura 25. Limites de consistência para o Solo Padrão (SP) e Solo Jazida (SJ), bem como para as misturas de Solo Padrão + Cimento *Portland*.





Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

#### 4.4.2 Granulometria das frações sólidas

De acordo com a análise granulométrica, ambos os solos apresentaram quantidades significativas de finos (argila e silte), tendo SP em torno de 59,2% e o SJ em torno de 73,9% (Tabela 10).

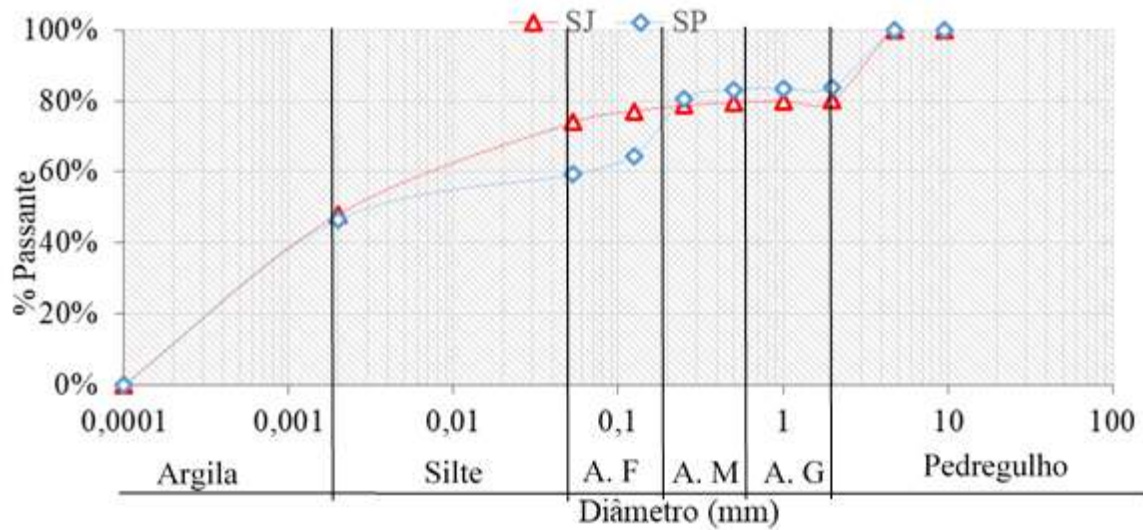
Tabela 10. Caracterização granulométrica do Solo Padrão (SP) e Solo Jazida (SJ).

	Argila	Silte	Areia					Pedregulho
			Muito fina	Fina	Média	Grossa	Muito grossa	
SP	46,5%	12,7%	5,3%	16,0%	2,7%	0,4%	0,4%	16,1%
SJ	48,0%	25,9%	3,1%	1,6%	0,8%	0,4%	0,2%	19,9%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

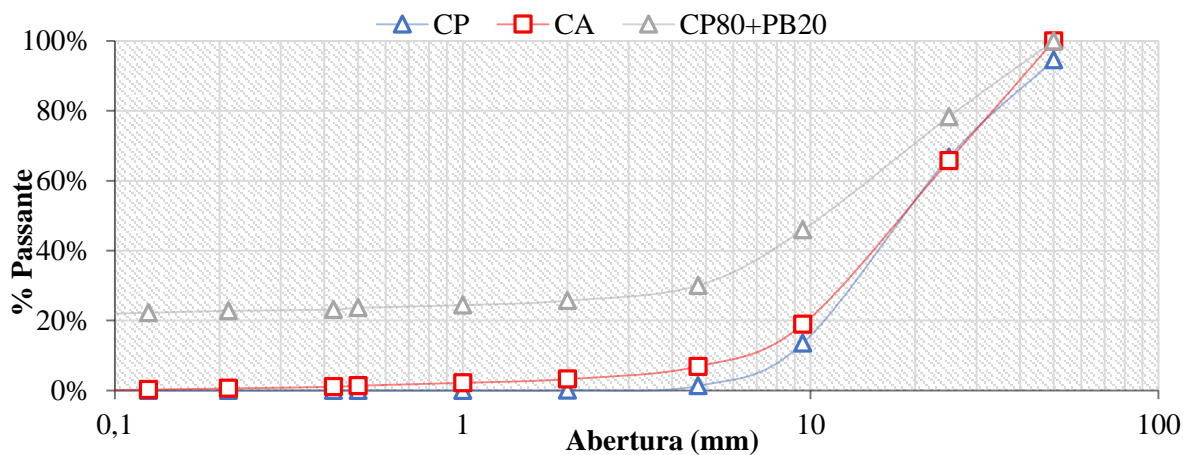
Na Figura 28 são apresentadas as curvas granulométricas para os solos (solo padrão e solos jazida) e Figura 29 para os materiais granulares (cascalho padrão e cascalho alternativo), vale ressaltar que os materiais granulares não se enquadraram em nenhuma das faixas granulométricas propostas pelo DNIT, evidenciando falhas nas curvas.

Figura 26. Curva granulométrica referente ao Solo Padrão (SP) e Solo Jazida (SJ).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

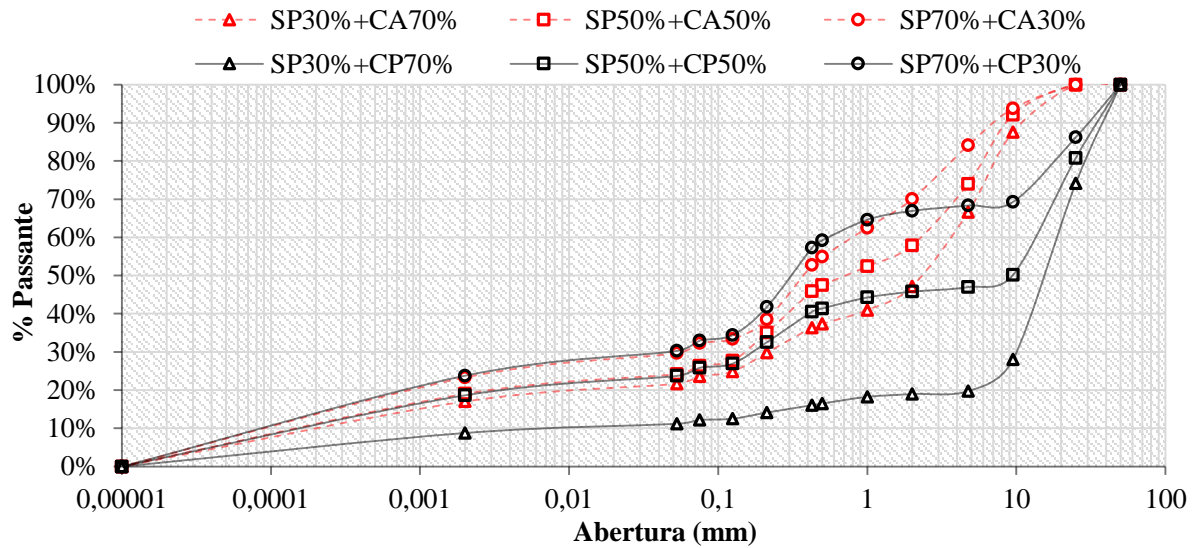
Figura 27. Curva granulométrica referente ao Cascalho padrão (CP), Cascalho alternativo (CA) e Cascalho Padrão + Pedrisco Basáltico (PB).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

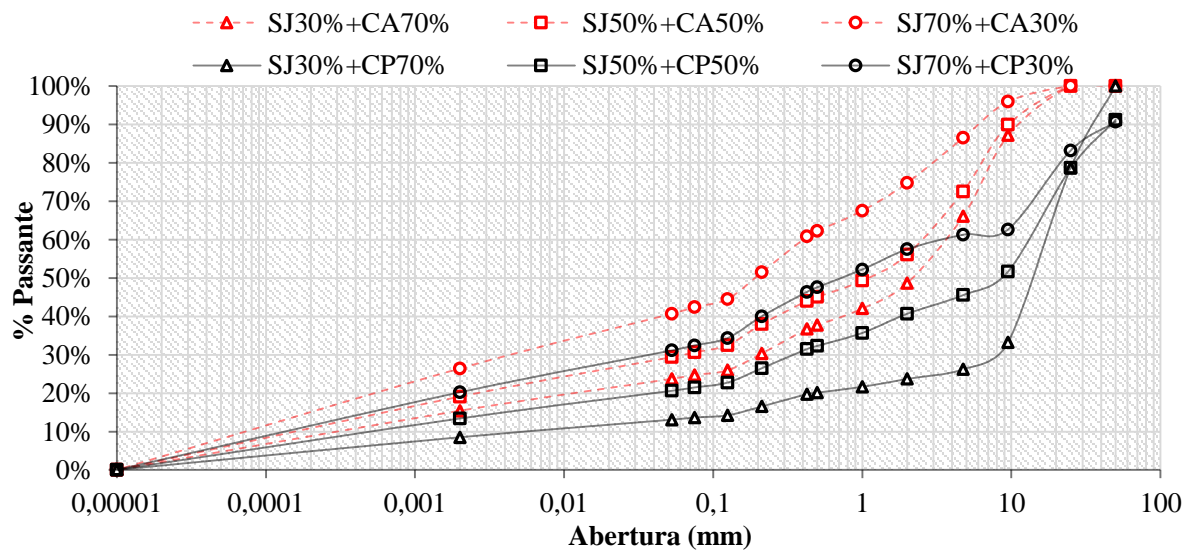
Com relação as misturas de Solo padrão e Solo Jazida com seus respectivos agregados de Cascalho padrão e Cascalho alternativo, é perceptível que as curvas entre o Solo Padrão com o Cascalho alternativo, e Solo Jazida com Cascalho Alternativo, apresentam um maior percentual de material passante, principalmente a partir das dimensões de 0,1 mm. Isto ocorre principalmente pelo cascalho Alterativo apresentar maior quantidade de material fino. (Figura 30 e 31), respectivamente, com um resumo de coeficientes  $C_u$  e  $C_c$  (Tabela 11).

Figura 28. Curva granulométrica referente ao Solo Padrão (SP) com Cascalho Padrão (CP) e Cascalho Alternativo (CA).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Figura 29. Curva granulométrica referente ao Solo Jazida (SJ) com Cascalho Padrão (CP) e Cascalho Alternativo (CA).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Tabela 11. Coeficiente de Uniformidade (Cu) e Coeficiente de Curvatura (Cc) para Solo Padrão (SP), Solo Jazida (SJ) e suas misturas com os agregados de Cascalho Padrão (CP) e Cascalho Alternativo (CA).

Mistura	Cu		Cc	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
SP30%+CP70%	1.220,0	±855,1	373,9	±275,9
SP70%+CP30%	5.992,1	±1.080,2	67,0	±115,2
SP50%+CP50%	88.235,3	±20.377,1	15,1	±5,8
SP30%+CA70%	12.555,6	±11.383,9	44,8	±30,3
SP70%+CA30%	10.000,0	±0,0	38,3	±37,6
SP50%+CA50%	16.666,7	±10.408,3	1.676,0	±1.436,9
SJ15%+CP85%	12.833	±10.128	788	±585
SJ30%+CP70%	5.513,9	±4.469,9	1.384,7	±1.303,2
SJ70%+CP30%	22.222,2	±7.698,0	2,5	±0,3
SJ50%+CP50%	33.000,0	±10.816,7	16,4	±5,3
SJ30%+CA70%	14.133,3	±1.803,7	41,8	±9,6
SJ70%+CA30%	6.222,2	±1.541,9	2,1	±2,6
SJ50%+CA50%	17.111,1	±2.694,3	7,5	±2,4

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

SP: Solo Padrão; CP: Cascalho Padrão; SJ: Solo Jazida; CA: Cascalho Alternativo.

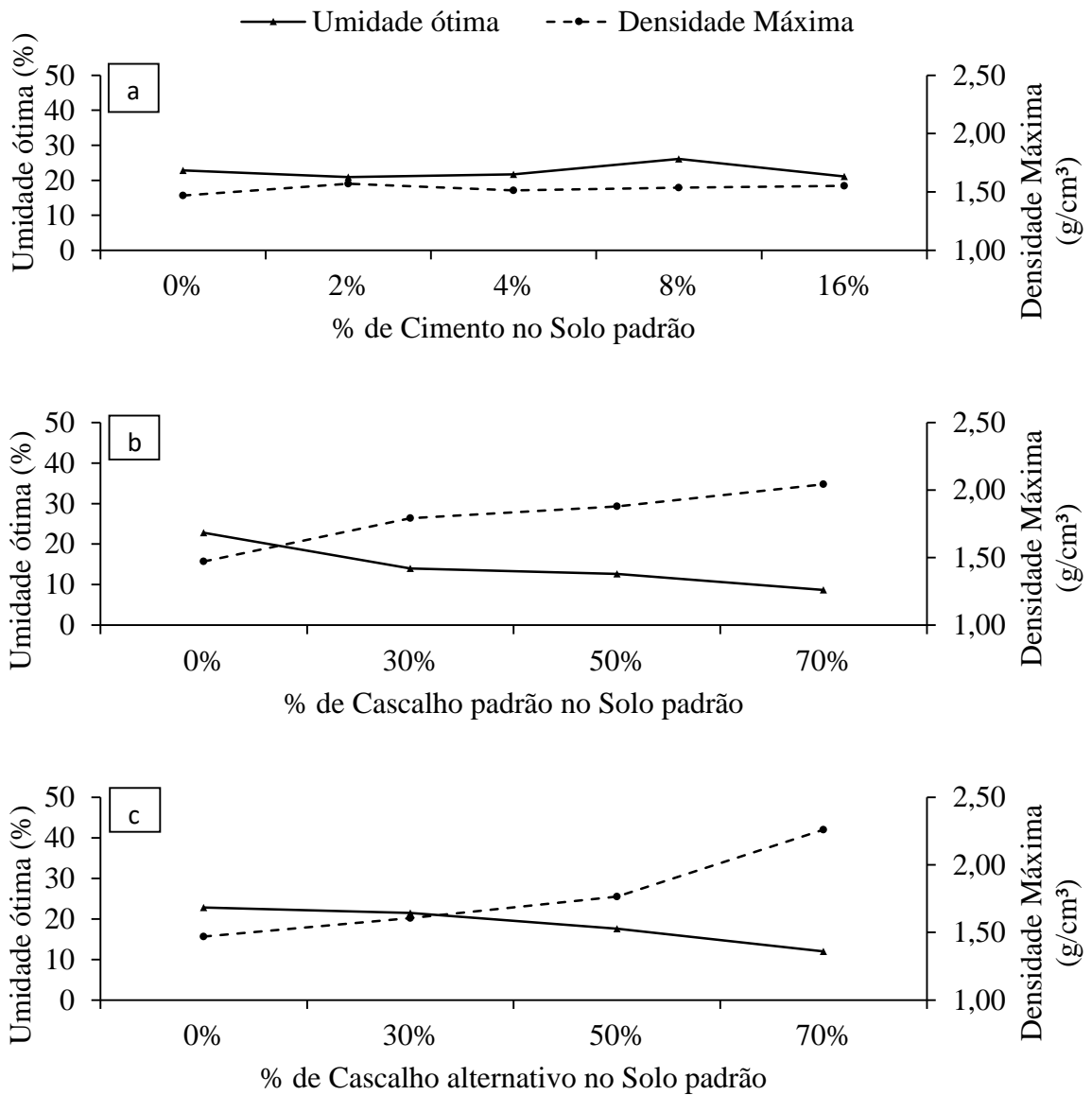
#### 4.4.3 Ensaio de compactação de Proctor

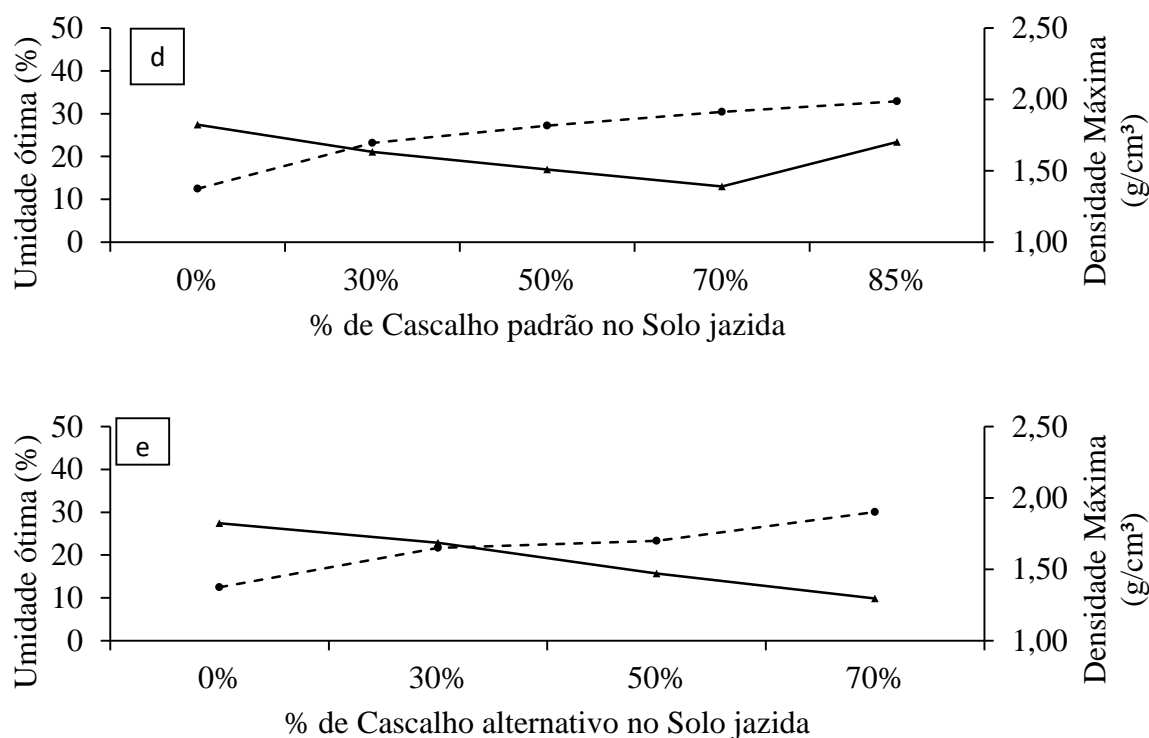
Paras as misturas de Cimento + solo padrão (Figura 30 a), é perceptível que foi a mistura que menos gerou incremento na densidade em relação ao solo puro, os valores de densidade partiram de 1,47 g/cm<sup>3</sup> para o solo puro, chegando a 1,55 para o percentual de 16%, (+5%).

Enquanto que para as misturas mecânicas (agregados) o solo padrão + cascalho padrão (Figura 30 b) permitiu que os valores de densidade chegassem a 2,04 g/cm<sup>3</sup> (+39%), valor este que foi inferior ao obtido com o cascalho alternativo (Figura 30 c), onde a densidade chegou a dobrar, atingindo a marca de 2,26 g/cm<sup>3</sup> (+54%), sendo o valor de destaque em relação aos demais.

Já o solo da jazida + o cascalho padrão (Figura 30 d) a densidade de 1,47 para 1,91 g/cm<sup>3</sup> (+39%), e com o cascalho alternativo (Figura 30 e), atingiu uma densidade de 1,90 g/cm<sup>3</sup> (+38%).

Figura 30. Parâmetros de umidade ótima e densidade máxima para a mistura química de solo padrão + cimento (a), e para as misturas mecânicas solo padrão + cascalho padrão (b), solo padrão + cascalho alternativo (c), solo jazida + cascalho padrão (d) e solo jazida + cascalho alternativo (e).





Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

#### 4.4.4 Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão

Quanto a mistura envolvendo o cimento (Figura 31 a), este conferiu um incremento ao ISC do solo em todos os percentuais de 2, 4, 8 e 16% (+120%, +68%, +33% e +360% respectivamente), valores estes que estão atrelados há um pequeno incremento em densidade, porém, com forte tendência em redução de expansão do solo, chegando a praticamente zero (0,1) no maior percentual de cimento (16%).

Já para as misturas mecânicas o solo padrão + cascalho padrão (Figura 31 b) apresentaram um incremento no ISC para as misturas de 30%, 50% e 70% de cascalho (+31%, +70% e +150%), atrelado a um aumento de densidade (+27%) para a mistura contendo 70% de cascalho, propiciando uma redução de expansão de 0,4 para 0,2%.

A mistura contendo solo padrão + cascalho alternativo (Figura 31 c) apresentaram um incremento no ISC para as misturas de 30%, 50% e 70% de cascalho (+61%, +131% e +190%), quanto a densidade e expansão (+24% e -25%, respectivamente).

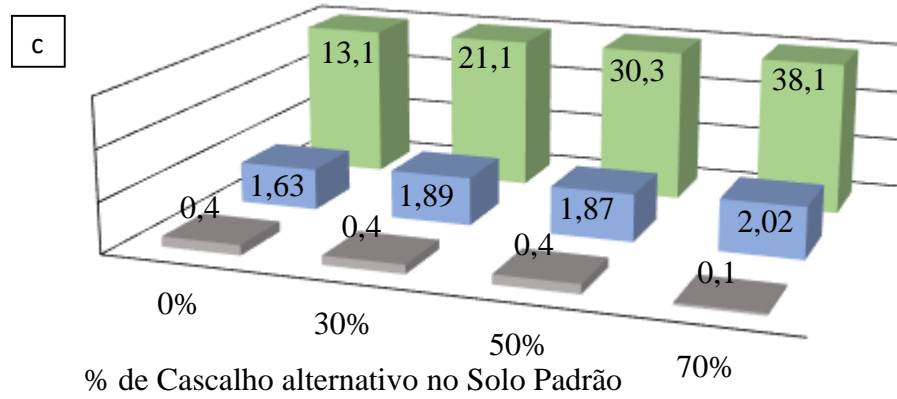
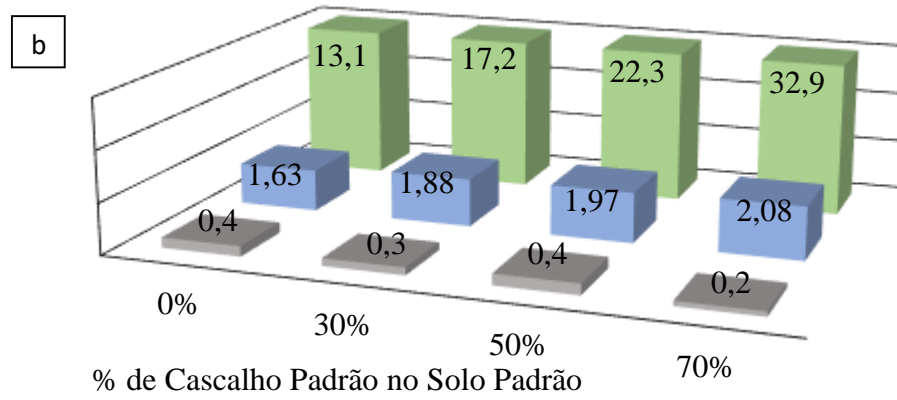
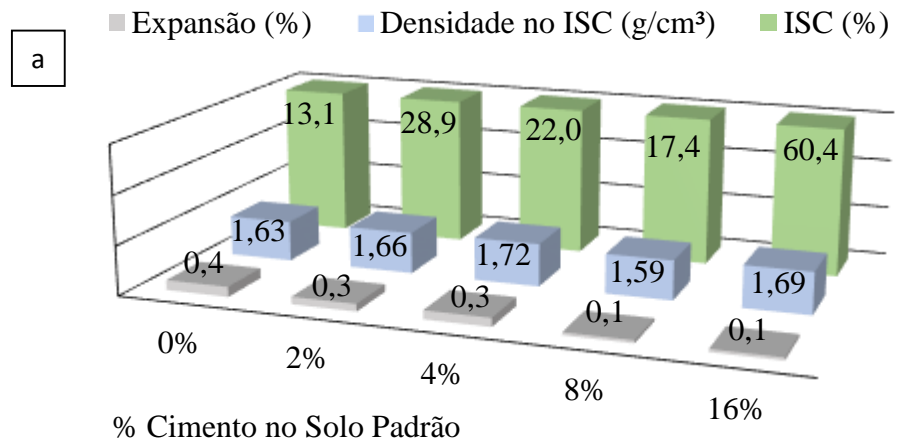
Para as misturas de solo jazida + cascalho padrão (Figura 31 d) apresentaram um incremento no ISC para as misturas de 30%, 50% e 70% de cascalho, porém de forma decrescente a medida que se acrescia a quantidade de cascalho (+121%, +104% e +66%),

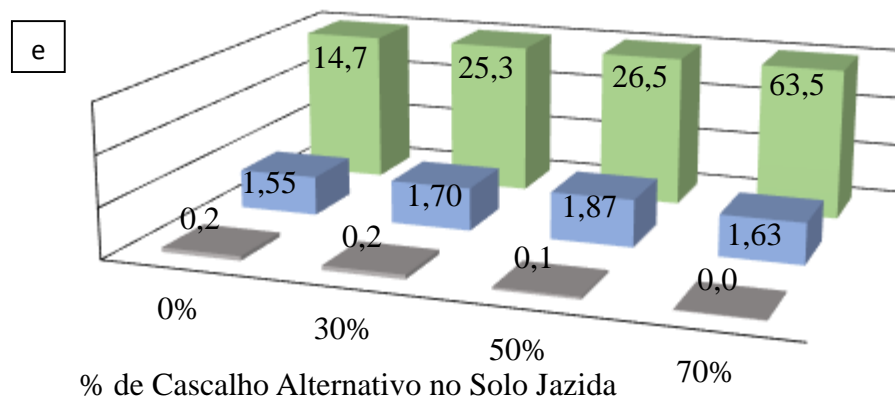
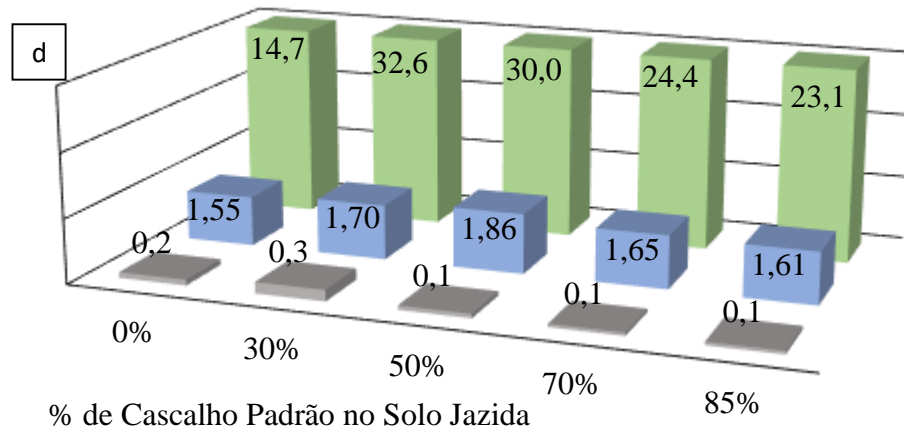
atrelado a um aumento de densidade (+20% para mistura de 50% de cascalho) para a mistura contendo 70% de cascalho, propiciando apenas um ganho de +6% em densidade, enquanto que a expansão reduziu de 0,2 para 0,1%.

Para a última mistura, sendo de solo jazida + cascalho alternativo (Figura 31 e) apresentaram um incremento no ISC, de forma crescente para as misturas de 30%, 50% e 70% de cascalho (+72%, +80% e +330%), atrelado a um aumento de densidade de 1,55 para 1,63 g/cm<sup>3</sup> (+5%), e proporcionando redução de expansão de 0,2 para 0,0%.

Figura 31. Parâmetros de Índice de Suporte Califórnia (ISC), densidade no ISC e expansão para a mistura química de solo padrão + cimento (a), e para as misturas mecânicas solo padrão +

cascalho padrão (b), solo padrão + cascalho alternativo (c), solo jazida + cascalho padrão (d) e solo jazida + cascalho alternativo (e).



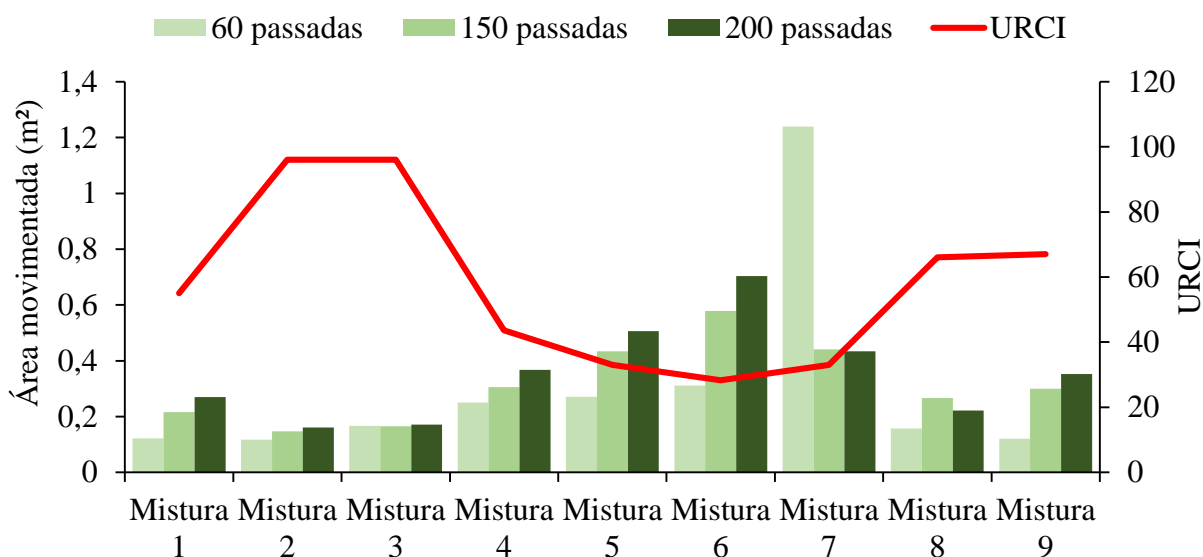


Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

#### 4.4.5 Desempenho dos trechos experimentais

Para melhor entender os resultados que serão apresentados no decorrer deste item, referente a avaliação da Índice de Condição de Rodovia Não Pavimentada - URCI, a Figura 32, demonstra a quantidade de solo movimentado em unidade de área ( $m^2$ ), proveniente principalmente da deformação ocorrida em cada um dos trechos, seja pela perda de agregado ou pela formação de trilhos de roda ocasionados pelos veículos, de acordo com o número de passadas.

Figura 32. Comparativo entre os resultados de URCI, obtidos para cada mistura vs a quantidade de solo movimentada em metros quadrados, bem como a evolução de acordo com o número de passadas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

De acordo com a análise de variância não foi constatado diferença significativa no efeito da interação mistura e número de passadas ( $p=0,0969$ ). Entretanto, foi possível verificar efeitos significativos para os efeitos principais de mistura ( $p=0,0001$ ) e número de passadas ( $p=0,0048$ ) (Tabela 13).

Tabela 12. Análise de variância para os efeitos de mistura, número de passadas e sua interação, considerando a área de solo movimentada. Análise realizada com a variável transformada pela função  $\log y$ .

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Valor de $F$
Mistura (M)	8	3,56	0,44	13,49**
Número de passadas (N)	2	0,39	0,19	5,90**
M*N	16	0,85	0,05	1,61
Resíduo	54	1,78	0,03	
Total	80	6,58		

\*\* Significativo a 1% de probabilidade; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio.

O fator quantitativo número de passadas (3 níveis) não pode ser representado através de modelos de regressão linear, tornando a sua interpretação dificultosa. Entretanto, ao observar os efeitos simples, todos os níveis de número de passadas (na média do efeito de mistura) revelam diferenças significativas.

Além disso, com o aumento do número de passadas, aumentou a área de solo movimentada. Com relação as misturas utilizadas, pode ser verificado pelo teste de Dunnett que as misturas 5, 6 e 7 revelaram diferenças significativas em relação a mistura 1 (Tabela 14).

Tabela 13. Teste de comparações múltiplas de médias de Dunnett para a Área de solo movimentada considerando a Mistura 1 como tratamento controle.

Tratamento	Média $\pm$ desvio	vs. Mistura 1
Mistura 1	0,067 $\pm$ 0,029	--
Mistura 2	0,047 $\pm$ 0,012	-0,020
Mistura 3	0,056 $\pm$ 0,023	-0,011
Mistura 4	0,102 $\pm$ 0,034	0,035
Mistura 5	0,134 $\pm$ 0,049	0,067*
Mistura 6	0,177 $\pm$ 0,072	0,109*
Mistura 7	0,235 $\pm$ 0,186	0,167*
Mistura 8	0,072 $\pm$ 0,027	0,004
Mistura 9	0,086 $\pm$ 0,068	0,018

\* Significativo a 5% de probabilidade.

Para as variáveis trilho de rodas e perda de agregado, realizou-se as médias e seus respectivos desvios, para as medidas referentes ao número de passadas vs a medição inicial (zero passadas). Nota-se a presença de valores positivos e negativos, demonstrando a variação (deformação) da pista de rolamento (Tabela 14).

Tabela 14. Médias e desvio padrão observados para as variáveis trilho de rodas e perda de agregados de acordo com a mistura e número de passadas.

Mistura	Nº passada	<i>Trilho de roda</i>	<i>Perda de agregados</i>
		Média ± desvio	Média ± desvio
1	60	-0,67 ± 1,25	0,13 ± 0,86
1	150	0,08 ± 0,92	1,33 ± 2,02
1	200	-3,25 ± 0,76	0,67 ± 3,08
2	60	-0,17 ± 1,03	-0,19 ± 0,91
2	150	-0,83 ± 1,03	0,15 ± 1,08
2	200	-0,83 ± 0,52	0,32 ± 1,22
3	60	1,50 ± 1,22	1,04 ± 1,63
3	150	2,08 ± 2,18	1,21 ± 1,51
3	200	2,42 ± 1,83	1,13 ± 2,04
4	60	-1,55 ± 2,92	1,61 ± 2,83
4	150	-3,22 ± 3,30	1,57 ± 3,66
4	200	-4,05 ± 2,78	1,32 ± 3,25
5	60	-1,42 ± 1,5	0,49 ± 3,03
5	150	-2,42 ± 1,83	1,72 ± 2,50
5	200	-4,17 ± 1,57	2,42 ± 3,88
6	60	-2,78 ± 2,17	2,12 ± 2,20
6	150	-5,62 ± 2,43	5,62 ± 5,60
6	200	-7,62 ± 3,66	4,78 ± 3,64
7	60	1,25 ± 11,59	-0,33 ± 12
7	150	4,75 ± 1,17	3,00 ± 5,25
7	200	2,58 ± 1,69	1,75 ± 6,52
8	60	0,33 ± 0,88	0,49 ± 0,9
8	150	1,33 ± 0,88	0,91 ± 1,22
8	200	0,00 ± 1,7	-0,76 ± 1,79
9	60	0,67 ± 1,33	0,25 ± 1,22
9	150	-0,58 ± 2,94	-1,58 ± 3,26
9	200	-1,17 ± 2,52	-2,42 ± 3,04

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Quanto a variável URCI, valores médios são expressos na Tabela 15, e valores totais abertos por número de passadas Figura 33, no tratamento 1, reduziu de 100 para 55 o índice, passando de uma condição excelente para regular, importante resultado, já que essa composição (12 cm de espessura, modal adotado pela empresa).

Já as mistura 2 e 3 (Camada de revestimento com mix de Cascalho padrão 85% + Solo jazida 15%; Camada de revestimento com mix de Cascalho padrão 80% + Pedrisco Basáltico

20%, respectivamente), mantiveram o índice em uma condição excelente (de 100 para 96), mesmo as duas misturas não sendo dimensionadas conforme metodologia específica para tal.

As misturas de número 4 (camada de revestimento com Cascalho padrão 100%. Porém, 18,7 cm composto com Pedra Rachão (Basalto originário de detonação da jazida, sem passar por processo de britagem, material com dimensões superiores a 2,5”), e os demais 10 cm com Cascalho padrão); 5 – (camada de revestimento com Cascalho padrão 100% e Camada de Reforço com mix de Cascalho padrão 50% + Solo padrão 50%); 6 – (camada de revestimento com Cascalho padrão 100% e Camada de reforço com mix de Cascalho padrão 70% + Solo jazida 30%); 7 – (camada de revestimento com Cascalho padrão 100% e Camada de reforço com mix de Cascalho padrão 50% + Solo jazida 50%), tiveram seus índices reduzidos à medida que o número de passadas foi sendo realizado, chegando a classificações de regular para a mistura 4 (caindo de 100 para 44), e pobre para as misturas 5, 6 e 7, que partiram de 100 para 33, 28 e 33 respectivamente.

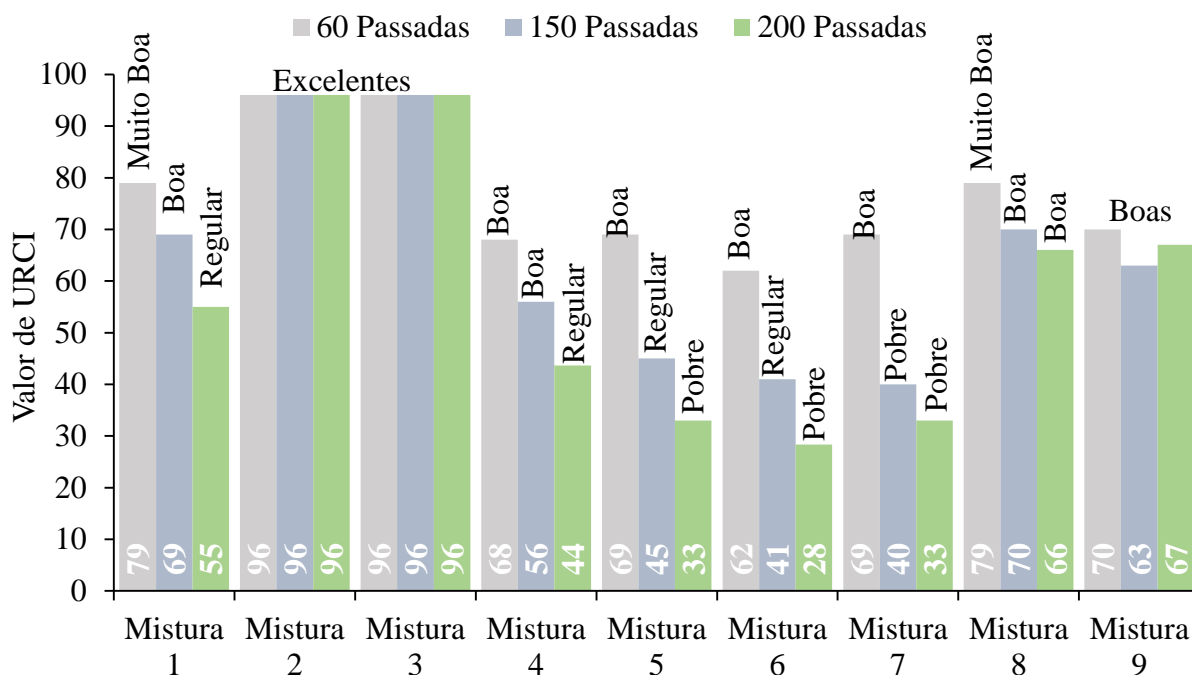
Enquanto que as misturas 8 – (camada de revestimento com mix de Cascalho padrão 70% + Solo jazida 30% e melhoria no subleito com aplicação de 2% de Cimento *Portland*) e mistura 9 – (camada de revestimento com Cascalho padrão 100% e melhoria no subleito com aplicação de 2% de Cimento *Portland*), se enquadraram na classificação de boas com resultado de 66 e 67 respectivamente.

Tabela 15. Respektivas médias e desvio padrão encontrado para a variável URCI, para as nove misturas avaliadas, para os três números de passadas (60, 150 e 200).

Tratamento	Média ± desvio
Mistura 1	67,67 ± 10,44
Mistura 2	96,00 ± 0,00
Mistura 3	96,00 ± 0,00
Mistura 4	55,89 ± 10,55
Mistura 5	49,00 ± 15,87
Mistura 6	43,78 ± 14,80
Mistura 7	47,33 ± 16,53
Mistura 8	71,67 ± 5,77
Mistura 9	66,67 ± 3,04

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Figura 33. Classificações referentes a avaliação URCI, para as nove misturas, em função do número de passadas dos veículos do tipo bitrem.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Considerando a variável URCI, foi utilizado Modelos lineares generalizados mistos, com uso do procedimento PROC GLIMMIX do SAS, O modelo com ajuste de distribuição normal revelou critério de Akaike de 183,44, Foram testadas distribuições conhecidas, sendo a Log normal escolhida pelo menor critério AIC (-178,95). A análise de variância revelou diferenças significativas para todos os fatores controlados (Tabela 17), já as médias e respectivos desvios (Tabela 13) apresentada anteriormente.

Tabela 16. Análise de variância para os efeitos de mistura, número de passadas e sua interação, considerando a variável URCI, Análise realizada com a especificação da distribuição lognormal.

Fonte de variação	GLN	GLD	Valor de <i>F</i>
Mistura (M)	8	54	1986,61**
Número de passadas (N)	2	54	2092,70**
M*N	16	54	196,47**

\*\* Significativo a 1% de probabilidade; GLN: Graus de liberdade no nominador; GLD: Graus de liberdade no denominador.

#### 4.5 DISCUSSÃO

O Solo Padrão e Solo Jazida, se caracterizaram como sendo solos finos, com predominância de silte e argila (TRB A-4 e A-5, respectivamente), com índice de plasticidade baixo, constatado com os resultados da Figura 27,  $IP = 4\%$  e  $2\%$ , respectivamente, estas classes TRB, possibilitam enquadrar os dois solos em patamares de comportamentos ruins para aplicação em forma de subleito (DNIT, 2006).

Com relação a classificação USCS, que baseia-se na classificação de solos por meio de suas qualidades texturais e de plasticidade, o solo padrão enquadrou no grupo ML, sendo solo extremamente siltoso com baixa compressibilidade (EMBRAPA, 2004), enquanto que o solo jazida apesar de enquadrar-se em outro grupo - OL, caracterizado como sendo um tipo orgânico de solo, podendo ser explicado devido sua origem, proveniente de decapeamento em jazida para extração de basalto, com possível mistura de material orgânico no momento de revolvimento do mesmo, porém, mesmo assim o solo também apresenta as mesmas características de solos finos, semelhante ao solo padrão (Figura 28).

Quanto aos dados de granulometria para o solo padrão e solo jazida (Figura 28), e cascalho padrão e cascalho alternativo (Figura 29), é perceptível que tanto o solo padrão como o cascalho padrão, apresentam uma característica de material mais grosseiro, pois apresentam quantidade menor de material passante nas classes de menor diâmetro das partículas, fato que pode corroborar com resultados de compactação e densidade, uma vez que materiais mais grosseiros, possuem uma maior dificuldade de alocação de partículas no processo de compactação (Medina e Motta, 2015; PINTO, 2006; TRINDADE, 2008).

Ainda de posse das curvas granulométricas é possível entender melhor o comportamento das mesmas por meio dos coeficientes de curvatura e uniformidade (Tabela 11), os quais são relacionados ao tamanho das partículas. Segundo Pinto (2006) diminuição do valor do Coeficientes de uniformidade significa que o solo está se tornando mais uniforme, ou seja, que a amplitude de tamanhos de grãos está diminuindo, enquanto que a diminuição de Coeficiente de curvatura mostra que as curvas do solo estão se tornando mais bem graduadas, e vice-versa. De modo geral, consideram-se solos uniformes, aqueles em que praticamente todas as partículas possuem exatamente o mesmo tamanho, determinado pela relação entre 10 e 60%. Enquanto que, o coeficiente de curvatura mede a inclinação da curva. Curvas suaves em toda a sua extensão, indicam solos ou materiais bem graduados (PINTO, 2006). A análise dos coeficientes indicou que ambos os solos (solo padrão e solo jazida) são desuniformes, porém são mediantemente graduados. Este fato evidencia a necessidade de trabalhar com composições que

confirmam melhor configuração dos índices, devido ao complemento de certas partículas e consequentemente resulte em melhores conformações para os ensaios de compactação e suporte. Os agregados do tipo cascalho padrão e cascalho alternativos, se comportaram como uniformes e bem graduados, apresentando uma inclinação suave da curva granulométrica.

Os resultados referentes ao ensaio de compactação, para as misturas de Cimento + solo padrão (Figura 32 a) foi a mistura que menos incrementou na densidade em relação ao solo puro, os valores de densidade partiram de  $1,47 \text{ g/cm}^3$  para o solo puro, chegando a 1,55 para o percentual de 16%, (+5%), porém, refletindo muito em resistência (ISC) (Figura 31a), este conferiu um incremento em todos os percentuais de 2, 4, 8 e 16% (+120%, +68%, +33% e +360% respectivamente), demonstrando a eficácia da estabilização com o uso do cimento *Portland* (McCarthy, 1977; WANG, 2002; FRANÇA, 2003).

Enquanto que para as misturas mecânicas (agregados) o solo padrão + cascalho padrão (Figura 31b) a densidade chegou a  $2,04 \text{ g/cm}^3$  (+39%), valor este que foi inferior ao obtido com o cascalho alternativo (Figura 31c), onde a densidade chegou a dobrar, atingindo a marca de  $2,26 \text{ g/cm}^3$  (+54%). O solo da jazida + o cascalho padrão (Figura 31d) a densidade de  $1,47$  para  $1,91 \text{ g/cm}^3$  (+39%), e cascalho alternativo (Figura 31e), atingiu uma densidade de  $1,90 \text{ g/cm}^3$  (+38%). Do ponto de vista de ISC, o solo padrão + cascalho padrão (Figura 31 b) apresentaram um incremento no ISC para as misturas de 30%, 50% e 70% de cascalho (+31%, +70% e +150%, respectivamente). A mistura contendo solo padrão + cascalho alternativo (Figura 31 c) apresentaram um incremento no ISC para as misturas de 30%, 50% e 70% de cascalho (+61%, +131% e +190%, respectivamente). O solo jazida + cascalho padrão (Figura 33 d) apresentaram um incremento no ISC para as misturas de 30%, 50% e 70% de cascalho, porém de forma decrescente à medida que se acrescia a quantidade de cascalho (+121%, +104% e +66%). Para a última mistura, sendo de solo jazida + cascalho alternativo (Figura 31e) apresentaram um incremento no ISC, de forma crescente para as misturas de 30%, 50% e 70% de cascalho (+72%, +80% e +330%), de modo geral, todas as misturas apresentaram ganhos importantes ao ISC das misturas, demonstrando a potencialidade da estabilização mecânica (GUIMARÃES, 2002), uma vez que este modo de estabilização consiste em utilizar dois ou mais materiais que de alguma forma garantam um incremento em índices de resistência ao solo, por meio do contato entre partículas e preenchimento de espaços vazios (GONDIM, 2008). De modo geral as misturas se enquadraram nos requisitos físicos necessários a uma base ou revestimento primário de uma via rural de uso florestal (MACEDO, 2004).

Do ponto de vista de avaliação em campo (Trecho experimental), os resultados de URCI (Figura 33), estão atrelados ao quanto de deformação/variação que ocorreu em cada mistura.

Misturas que apresentaram melhor inter-travamento de partículas, apresentaram menores deformações, e conseqüentemente melhores resultados para URCI. Não necessariamente as misturas com as maiores espessuras de camadas, foram as que se saíram melhor, justamente pela relação de inter-travamento (agulhamento). A mistura 1, reduziu o valor de URCI de 100 para 55, passando de uma condição excelente para regular, importante resultado, já que essa composição (12 cm de espessura e 100% cascalho padrão).

Já as misturas 2 e 3 mantiveram o índice em uma condição excelente (de 100 para 96), mesmo as duas misturas não sendo dimensionadas conforme metodologia específica para tal. As misturas de número 4, 5, 6 e 7 tiveram seus índices reduzidos à medida que o número de passadas foi sendo realizado, chegando a classificações de regular para a mistura 4 (caindo de 100 para 44), e pobre para as misturas 5, 6 e 7, que partiram de 100 para 33, 28 e 33 respectivamente. E as misturas 8 e 9 se enquadraram na classificação de boas com resultado de 66 e 67 respectivamente.

#### 4.5 CONCLUSÕES

Segundo a classificação TRB, os solos se enquadram no grupo dos solos siltosos, e apresentam características de ruim a mal para aplicação em uso rodoviário. E pela classificação USCS o solo padrão e solo jazida enquadram-se como um material de baixa compressibilidade grupo (L), porém, o solo jazida apresentando maiores características de solo orgânicos do tipo (O) enquanto o solo padrão é do tipo (M).

Com relação ao cascalho padrão foi visível em sua curva granulométrica o déficit de materiais com dimensões inferiores a 4 mm, diferentemente do cascalho alternativo que possui maior quantidade de agregados finos em sua composição, apresentando melhores características para a compactação e conseqüentemente maior índice de suporte.

Quanto aos ensaios de *Proctor*, foi notável que a medida que aumenta o percentual de cascalho, a umidade ótima reduz e densidade máxima aumenta. Quanto ao ISC, o solo padrão aumentou o índice para ambos os cascalhos, à medida que aumentava o percentual de material granular, tendência não observada para o solo jazida.

As misturas que apresentaram desempenho satisfatório foram as misturas 2, 3, 8 e 9, porém, as misturas 2 e 3 não seguiram metodologia de dimensionamento. As misturas 8 e 9 foram dimensionadas, e apresentaram bom desempenho devido a melhoria que o leito recebeu com cimento, aumentando a sua capacidade de suporte. Do ponto de vista operacional a mistura

número 2, é mai indicada, em termos de custo, pois 15% de sua composição é composta de solo, o que a torna mais barata e fácil de ser elaborada.

#### 4.6 REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. **Koppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

BASU, G. et al. Construction of unpaved rural road using jute–synthetic blended woven geotextile – A case study. **Geotextiles and Geomembranes**, [S.l.], v. 27, p. 506-512, ago. 2009.

BISWAL, D. R.; SAHOO, U. C.; DASH, S. R. Characterization of granular lateritic soils as pavement material. **Transportation Geotechnics**, Netherlands, v. 6, p. 108-122, out. 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Boletim estatístico da confederação nacional dos transportes nº 5**, 2018. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Boletim/boletim-estatistico-cnt>>. Acesso em: 01 set. 2018.

CHOOBBASTI, A. J.; KUTANAEI, S. S. Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, China, v. 9, p. 981-988, ago. 2017.

DISFANI, M. M. et al. Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications. **Journal of Cleaner Production**, Netherlands, v. 20, p. 170-179, ago. 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER ME 051/94. Solos: **Solos – análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1994a. 13 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER ME 129/94. Solos: **Compactação utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 1994b. 8 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER ME 049/94. Solos: **Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 1994c. 15 p.

DUC, B. V.; KENNEDY, O. Adsorbed complex and laboratory geotechnics of Quarry Dust (QD) stabilized lateritic soils. **Environmental Technology & Innovation**, Netherlands, v. 10, p. 355-363, abr. 2018.

EATON, R.A.; GERARD, S.; CATE, D. W. **Rating unsurfaced roads - A field manual for measuring maintenance problems**. Special Report 87-15. U.S. Army Corps of Engineers. Cold Regions Research & Engineering Laboratory, 1987.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA (EMBRAPA). **Boletim de pesquisa e desenvolvimento: Solos do estado de Santa Catarina**. nº 46, 2004.

EMMERT, F.; PEREIRA, R. S. Caracterização geotécnica e classificação de solos para estradas florestais: Estudo de caso. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 601-613, abr.-jun., 2016.

FALLA, G. C. et al. Characterization of unbound granular materials within a mechanistic design framework for low volume roads. **Transportation Geotechnics**, Netherlands, v. 13, p. 2-12, set. 2017.

FRANÇA, F. F. **Estabilização química de solos para fins rodoviários**: Estudo de caso com o produto “RBI Grade 81”. p. 104. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2003.

FAIZ, A. **The Promise of Rural Roads**. Transportation Research Circular, set. 2012. 52 p.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de Mistura solo-emulsão aplicado às rodovias do agropolo do baixo Jaguaraipe/Estado do Ceará**. Universidade federal do Ceará. 2008.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal: Fundamentos e aplicações na Engenharia Civil**. 2ª ed. São Paulo. p. 341. 2002.

HAZIRBABA, K.; GULLU, H. 2010. California Bearing Ratio improvement and freeze–thaw performance of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic fluid. **Cold Regions Science and Technology**, Netherlands, v. 63, p. 50-60, maio 2010.

HOUGH, B. K. **Basic soils engineering**. 2.ed. New York: The Ronald Prees Company, 1969. 634p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. BDMEP Dados Históricos. 2015. Disponível em:< <http://www.inmet.gov.br/portal/>> . Acesso em: 03 dez. 2018.

JONES, D. et al. **Guidelines for the stabilization of subgrade soils in California**. Institute of Transportation Studies. University of California, Davis, Research Report – UCD-ITS-RR-10-38; 2010.

KELLER, G. R. Application of geosynthetics on low-volume roads. **Transportation Geotechnics**, Netherlands, v. 8, p. 119-131, abr. 2016.

KUTTAH, D.; ARVIDSSON, H. Effect of groundwater table rising on the performance of a Swedish-designed gravel road. **Transportation Geotechnics**, Netherlands, v. 11, p. 82-96, maio 2017.

MACHADO, C. C.; LIMA, D. C.; CARVALHO, C. A. B. Pavimentação. In: MACHADO, C. C.. Construção e conservação de estradas rurais e florestais. Viçosa: O Editor, 2013, p. 83-258.

MCCARTHY, D. F. P. E. **Essential of soil mechanics and foundation**. Virginia, Reston publishing company. p. 505. 1977.

MORAFÁ, S. H. et al. An experimental investigation on applying the recycled aggregates obtained from oil contaminated concrete exposed to seawater as road unbound pavement materials. **Construction and Building Materials**, Netherlands, v. 157, p. 292-299, set. 2017.

O'FLAHERTY, C. A. et al. **Highways: The location, design, construction and maintenance of road pavements**. Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2002. 576 p.

PAPANICOLAOU, T. et al. **Development of a subgrade drainage model for unpaved roads**. **IHR – Hydrosience & Engineering**, Department of Civil & Environmental Engineering, the University of Iowa, USA, Final report no. TR-654; 2015.

PEREIRA, R. S. et al. Estabilização mecânica de solos como alternativa na construção de estradas florestais de baixo custo. **Nativa**, Mato Grosso, v. 5, n. 3, p. 212-217, maio-jun. 2017.

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

RAJKAMAL, K. et al. Performance Evaluation of Gravel Road Sections Sealed with Surface Dressing. **Transportation Research Procedia**, Netherlands, v. 17, p. 81-89, dez. 2016.

RASUL, J. M.; BURROW, M. P. N.; GHATAORA, G. S. Consideration of the deterioration of stabilised subgrade soils in analytical road pavement design. **Transportation Geotechnics**, Netherlands, v. 9, p. 96-109, ago. 2016.

ROSENAK, S. **Soil Mechanics**. London: B. T. Batsford LTD, 1963, 190p.

TRINDADE, T. P. et. al. **Compactação de solos: fundamentos teóricos e práticos**. 1.ed. Viçosa: UFV, 2008. 95 p.

WANG, L. **Cementitious stabilization of soils in the presence of sulfate**. Department of civil & Environment Engineering. (Thesis). Wuhan University of Technology. Louisiana, 2002.

YANG, X. et al. Accelerated pavement testing of unpaved roads with geocell-reinforced sand bases. **Geotextiles and Geomembranes**, Netherlands, v. 32, p. 95-103, 2012.



## 5 CONCLUSÕES GERAIS

Quanto ao solo-resíduo, o solo com adição de *Dregs* aumentou o índice de plasticidade do solo, apesar de o mesmo ter apresentado um incremento nos Índices de Suporte Califórnia, para os menores percentuais. Já o uso de *Grits*, apresentou tendência de redução no índice de plasticidade nos três menores percentuais utilizados. Apresentou um incremento na densidade do solo, apesar de não refletir no índices de Índices de Suporte Califórnia. A Lama de Cal, revelou incremento no índice de suporte nos menores percentuais (2 e 4%), não elevou os índices de plasticidade ao longo de todas as misturas, porém, apresentou expansão superior a 0,5%, em sua maior dosagem em relação ao solo puro. De modo geral, sendo a mistura que apresentou as melhores características, a serem aplicada como reforço de um subleito.

Já para as misturas de solo-cimento e solo-cascalhos, com relação ao cascalho padrão foi visível em sua curva granulométrica o déficit de materiais com dimensões inferiores a 4 mm, diferentemente do cascalho alternativo que possui maior quantidade de agregados finos em sua composição, facilitando a compactação, e consequentemente melhorando os índices de suporte. No ensaios de *Proctor*, foi notável que a medida que aumenta o percentual de cascalho, a umidade ótima reduz e densidade máxima aumenta. Quanto ao ISC, o solo padrão aumentou o índice para ambos os cascalhos, à medida que aumentava o percentual de material granular, tendência não observada para o solo jazida.



## REFERENCIAS

ALCÂNTARA, M. A. M. **Estabilização química dos solos para fins rodoviários: técnicas disponíveis e estudo de caso dirigido à estabilização solo-cal de três solos de Ilha Solteira - SP.** 1995. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

BAESSO, D. P.; GONÇALVES, F. L. R. **Estradas Rurais: técnicas adequadas de manutenção.** Florianópolis: DER-SC, 2003. 236 p.

BALBO, J. T. Alguns conceitos diferenciadores dos materiais estabilizados com cimento. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 7., 1996, São José dos Campos, SP. **Anais...** São José dos Campos, SP: [s.n.], 1996. p. 275-294.

BAPTISTA, C. F. N. **Pavimentação: Tomo I: ensaios fundamentais para pavimentação, dimensionamento dos pavimentos flexíveis.** 3. ed. Porto Alegre: Globo, 1978. 253 p.

BRAZETTI, R. Aditivos orgânicos para estabilização de solos: origens e pesquisas. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 7., 1996, São José dos Campos, SP. **Anais...** São José dos Campos, SP: [s.n.], 1996. p. 186-209.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos.** Viçosa: Universidade de Viçosa, 1980. 131p.

CAPUTO H.P., (1988). **Mecânica de solos e suas aplicações – Fundamentos**, v. 1, 6ta edição – Livros Técnicos e Científicos editora, Rio de Janeiro, Brasil.

CARVALHO, C. A. B. **Estudo da contribuição das deformações permanentes das camadas de solo na formação das trilhas-de-roda num pavimento flexível.** 1997. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1997.

COMPANIA PERNAMBUCANA DE MEIO AMBIENTE – CPRH. **Roteiro complementar de licenciamento e fiscalização: indústria de papel e celulose.** Publicações Projeto CPRH/GPZ: Recife, Pernambuco, 1998. 95 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Boletim estatístico da confederação nacional dos transportes nº 5**, 2018. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Boletim/boletim-estatistico-cnt>>. Acesso em: 01 set. 2018.

COZZOLINO, V. M. N.; NOGAMI, J. S. Classificação MCT para solos tropicais. **Solos e rochas**, [S. l.], v. 16, n. 2, p. 77-91, 1993.

CRAIG, R. F. **Soil mechanics**. 2. ed. New York: Van Nostrand Runholds Company, 1980. 318 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de pavimentação**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1996. (Antigo DNER).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER ME 049/94. Solos: **Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 1994. 14 p.

EMMERT, F. **Avaliação do emprego da técnica de estabilização de solo na melhoria de estradas florestais da região de Niquelândia-GO**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2010.

FORBES, R. D. **Forestry handbook**. New York: The Ronald Press Company, 1955.

HOGENTOGLER, C. A. **Engineering properties of soil**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1937. 434 p.

KEZDI, A.; RETHATI, L. **Handbook of soil mechanics: soil mechanics of earthworks, foundations and highway engineering**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 1988. 361 p.

KORMANN, A. C. M. **Ensaio de compactação e caracterização**. Curitiba, UFPR, 1997. <<http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/e/e1/Apostila1.pdf>> Acesso em: 01 set. 2018.

LAMBE, T. W.; MICHAELS, A. Altering soil properties with chemicals. **Chemical Engineering Journal**, [S.I.], v. 32, n. 6, p. 488-492, 1954.

LIMA, D. C. **Algumas considerações relativas a aspectos da estabilização dos solos, em particular à estabilização solo-cal**. 1981. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1981.

MACEDO, M. M. **Solos modificados com cimento – efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco. CTG Engenharia Civil, 2004.

MACHADO, C. C.; MALINOVSKI, J. R. **Rede viária florestal.** Curitiba: FUPEF, 1986. 156 p.

MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P.; LEITE, A. M. Análise do desempenho de diferentes veículos de transporte florestal rodoviário. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 15, n. 1, p. 67-81, 1991.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S.; BIRRO, M. H. **Elementos básicos do transporte florestal rodoviário.** Viçosa, MG: UFV, 2000. 167 p.

MACHADO, C. C.; LIMA, D. C.; CARVALHO, C. A. B. Pavimentação. In: MACHADO, C. C.. **Construção e conservação de estradas rurais e florestais.** Viçosa: O Editor, 2013, p. 83-258.

MALINOVSKI, J. R.; CAMARGO, C. M. S.; MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, R. A.; CASTRO, G. P. Sistemas. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal.** 3º edição. Viçosa: UFV, 2014. p. 178 – 205.

MALINOVSKI, J. R.; PERDONCINI, W. C. **Estradas Florestais.** Irati: Publicação Técnica do Colégio de Irati, 1990. 100 p.

MEDINA, J. MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** 2ª ed. Rio de Janeiro. Editora UFRJ, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais.** 3ª Ed. IBRACON. Português, p. 674, 2008.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** São Paulo: Villibor, 1995. 213 p.

O'FLAHERTY, C. A. et al. **Highways: The location, design, construction and maintenance of road pavements.** Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2002. 576 p.

PEREIRA, R. S. **Viabilidade técnica do emprego de resíduos da indústria de celulose para construção de estradas florestais.** 2005. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

PEREIRA, R. S.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B. de. Uso de resíduos em pavimentos de estradas florestais: caracterização de solos e misturas solo-grits. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 629-635, ago. 2006.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. São Paulo: Ed. Globo, 1998.

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

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Subgrades, sub bases and shoulders for concrete pavement**. Skokie, Illinois, 1960. 5 p.

RANGEL, A. C. R. **Pavimentação de Estradas Florestais**. IPEF, Circular técnica nº 122, 1980.

REICHERT, J. M. et al. **Mecânica do Solo**. In: JONG VAN LIER, Q. Física do Solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.29-102, 2010.

RENEDO, V.S.G. **Dinámica y mecánica de suelos**. Madrid: Ediciones Agrotécnicas, S.L., 1996. 426p.

REZENDE, L.R. **Técnicas alternativas para construção de bases de pavimentos rodoviários**. 1999. 169 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)- Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 1999.

SANT'ANNA, G. L. **Estradas florestais: Caracterização geotécnica e comportamento mecânico de solos e misturas solo-grits, cargas de tráfego e seus efeitos**. Viçosa, MG: UFV, 2006. 146 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa.

SMOOK, G.A. **Handbook for pulp & paper technologists**. Vancouver, Bellingham, Canada: Angus Wilde Publications, 2. ed., 1994. 419 p.

TRINDADE, T. P. et al. Estudo da durabilidade de misturas solo-RBI grade 81 com vistas à aplicação em estradas florestais e camadas de pavimentos convencionais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 591-600, jul./ago. 2005.

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

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1977. 509 p.

VISSER, A. T.; HUDSON W. R. **Performance, Design and Maintenance Relations for Unpaved Low-Volume Roads**. In: Third International Conference on Low-Volume Roads, Transportation Research Record 898, Washington, D.C., USA. Volume 1, 1983, p.164-174.



## ANEXOS

## Anexo A. Propriedades químicas dos resíduos Dregs, Grits e Lama de Cal.

PARÂMETRO	1ª e 2ª LEGISLAÇÃO	Dregs	Gritz	Lama de Cal	Unidade
Aspecto - - Homogêneo -	-	Homogêneo	Homogêneo	Homogêneo	-
Corrosividade - - Ausência -	-	Ausência	Ausência	Ausência	-
Densidade - - 0,84 g/mL	-	0,84	1,46	0,63	g/mL
Inflamabilidade - - Ausência -	-	Ausência	Ausência	Ausência	-
Líquidos Livres - - Presença -	-	Presença	Presença	Ausência	-
Lixiviado - 1,1-Dicloroetileno	≤ 3,0	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - 1,2-Dicloroetano	≤ 1,0	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - 1,4-Diclorobenzeno	≤ 7,5	< 0,004	< 0,004	< 0,004	mg/L
Lixiviado - 2,4,5-T	≤ 0,2	< 0,010	< 0,010	< 0,010	mg/L
Lixiviado - 2,4,5-TP	≤ 1,0	< 0,010	< 0,010	< 0,010	mg/L
Lixiviado - 2,4,5-Triclorofenol	≤ 400,0	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - 2,4,6-Triclorofenol	≤ 20,0	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - 2,4-D	≤ 3,0	< 0,010	< 0,010	< 0,010	mg/L
Lixiviado - 2,4-Dinitrotolueno	≤ 0,13	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Aldrin + Dieldrin	≤ 0,003	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Arsênio	≤ 1,0	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0010	mg As/L
Lixiviado - Bário Total	≤ 70,0	< 0,200	< 0,200	0,293	mg Ba/L
Lixiviado - Benzeno	≤ 0,5	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Benzo (a) pireno	≤ 0,07	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	mg/L
Lixiviado - Cádmio Total	≤ 0,5	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0010	mg Cd/L
Lixiviado - Chumbo	≤ 1,0	< 0,010	< 0,010	< 0,010	mg Pb/L
Lixiviado - Clordano (todos os isômeros)	≤ 0,02	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Cloreto de Vinila	≤ 0,5	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Clorobenzeno	≤ 100	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Clorofórmio	≤ 6,0	< 0,004	< 0,004	< 0,004	mg/L
Lixiviado - Cromo Total	≤ 5,0	0,238	< 0,031	0,031	mg Cr/L
Lixiviado - DDT (p,p'-DDT + p,p'-DDE + p,p'-DDD)	≤ 0,2	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Endrin	≤ 0,06	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Fluoretos	≤ 150,0 mg/L	1,9	1,83	0,42	mg F- /L
Lixiviado - Heptacloro + Heptacloro Epóxido	≤ 0,003	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Hexaclorobenzeno	≤ 0,1	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Hexaclorobutadieno	≤ 0,5	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Hexacloroetano	≤ 3,0	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Lindano	≤ 0,2	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L

Lixiviado - m-Cresol	≤ 200,0	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Massa Utilizada	-	5,0802	5,0246	4,87	g
Lixiviado - Mercúrio	≤ 0,1	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0010	mg Hg/L
Lixiviado - Metiletilcetona	≤ 200,0	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Metoxicloro	≤ 2,0	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Nitrobenzeno	≤ 2,0	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - o-Cresol	≤ 200,0	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - p-Cresol	≤ 200,0	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Pentaclorofenol	≤ 0,9	< 0,005	< 0,005	< 0,005	mg/L
Lixiviado - Piridina	≤ 5,0	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Prata Total	≤ 5,0	< 0,020	< 0,020	< 0,020	mg Ag/L
Lixiviado - Selênio Total	≤ 1,0	0,005	< 0,005	0,006	mg Se/L
Lixiviado - Tempo de Lixiviação - - 20 h	-	20	20	20	h
Lixiviado - Tetracloroeto de Carbono	≤ 0,2	< 0,002	< 0,002	< 0,002	mg/L
Lixiviado - Tetracloroetileno	≤ 4,0	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Toxafeno	≤ 0,5	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Lixiviado - Tricloroetileno	≤ 7,0	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg/L
Massa Bruta - Cianeto	≤ 250	< 0,010	< 0,010	< 0,010	mg/kg
Massa Bruta - pH	entre 2 e 12,5	11,25	12,46	6,61	pH a 25° C
Massa Bruta - Sulfeto	≤ 500	75,07	57,96	14,69	mg/kg
Massa Bruta - Umidade	-	33,33	29,78	73,75	%
Patogenicidade	-	Ausência	Ausência	Ausência	
pH Final	-	8,71	12,45	5,09	pH a 25° C
pH Inicial	-	11,25	12,46	6,61	pH a 25° C
Reatividade	-	Não reativo	Não reativo	Não reativo	-
Solubilizado - 2,4,5-T	≤ 0,002	< 0,000050	< 0,000050	< 0,000050	mg/L
Solubilizado - 2,4,5-TP	≤ 0,03	< 0,000050	< 0,000050	< 0,000050	mg/L
Solubilizado - 2,4-D	≤ 0,03	< 0,000050	< 0,000050	< 0,000050	mg/L
Solubilizado - Aldrin + Dieldrin	≤ 0,00003	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	mg/L
Solubilizado - Alumínio Total	≤ 0,2	0,473	0,186	0,219	mg Al/L
Solubilizado - Arsênio	≤ 0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg As/L
Solubilizado - Bário Total	≤ 0,7	< 0,200	0,597	0,237	mg Ba/L
Solubilizado - Cádmio Total	≤ 0,005	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg Cd/L
Solubilizado - Chumbo	≤ 0,01	< 0,010	< 0,010	< 0,010	Pb/L

Solubilizado - Cianeto Total	≤ 0,07	<0,001	<0,001	0,004	mg CN/L
Solubilizado - Clordano (todos os isômeros)	≤ 0,0002	< 0,00005 0	< 0,00005 0	< 0,000050	mg/L
Solubilizado - Cloreto	≤ 250,0 mg/L	415,2	19,3	< 14,9	mg Cl/L
Solubilizado - Cobre	≤ 2,0	0,107	< 0,010	< 0,010	mg Cu/L
Solubilizado - Cromo Total	≤ 0,05	0,658	< 0,031	<0,031	mg Cr/L
Solubilizado - DDT (todos os isômeros)	≤ 0,002	< 0,00005 0	< 0,00005 0	< 0,000050	mg/L
Solubilizado - Endrin	≤ 0,0006	< 0,00005 0	< 0,00005 0	< 0,000050	mg/L
Solubilizado - Fenóis Totais	≤ 0,01 mg/L	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	mg C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH/ L
Solubilizado - Ferro	≤ 0,3	0,197	< 0,080	1,565	mg Fe/L
Solubilizado - Fluoretos	≤ 1,5 mg/L	10,1	2,85	< 0,09	mg F <sup>-</sup> /L
Solubilizado - Heptacloro + Heptacloro Epóxido	≤ 0,00003	< 0,00003 0	< 0,00003 0	< 0,000030	mg/L
Solubilizado - Hexaclorobenzeno	≤ 0,001	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0010	mg/L
Solubilizado - Lindano (g-BHC)	≤ 0,002	< 0,00000 50	< 0,00000 50	< 0,000005 0	mg/L
Solubilizado - Manganês Total	≤ 0,1	0,182	< 0,020	4,456	mg Mn/L
Solubilizado - Mercúrio	≤ 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	mg Hg/L
Solubilizado - Metoxicloro	≤ 0,02	< 0,00005 0	< 0,00005 0	< 0,000050	mg/L
Solubilizado - Nitrato (como N)	≤ 10,0 mg/L	7,6	12	2,7	mg/L NO <sub>3</sub> -N
Solubilizado - Prata Total	≤ 0,05	< 0,020	< 0,020	< 0,020	mg Ag/L
Solubilizado - Selênio Total	≤ 0,01	< 0,005	< 0,005	< 0,005	mg Se/L
Solubilizado - Sódio	≤ 200,0	1317,95 9	1439,00 1	103,685	mg Na/L
Solubilizado - Sulfato	≤ 250,0 mg/L	122,6	246,4	2,4	mg SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> /L
Solubilizado - Surfactantes Aniônicos	≤ 0,5	1,685	10,745	0,285	mg/L
Solubilizado - Toxafeno	≤ 0,005	< 0,00005 0	< 0,00005 0	< 0,000050	mg/L
Solubilizado - Zinco	≤ 5,0	< 0,065	< 0,065	< 0,065	mg Zn/L
Teor de Sólidos Secos	-	66,67	70,22	26,25	%
Toxicidade	-	Não tóxico	Não tóxico	Não tóxico	-

Fonte: Klabin S.A, 2018.