

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GUILHERME SARTORI

**ESTUDO DE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS PARA FINS DE
PAVIMENTAÇÃO NA REGIÃO DE CAMPO MOURÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2015

GUILHERME SARTORI

**ESTUDO DE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS PARA FINS DE
PAVIMENTAÇÃO NA REGIÃO DE CAMPO MOURÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof.^a Me. Eliana Fernandes dos Santos

CAMPO MOURÃO

2015



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

ESTUDO DE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO NA REGIÃO DE CAMPO MOURÃO

por

Guilherme Sartori

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 13h 50min do dia 02 de dezembro de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Esp. Sérgio Oberhauser Q. Braga

(UTFPR)

Prof^ª. Ma. Paula Cristina de Souza

(UTFPR)

Prof^ª. Ma. Eliana Fernandes dos Santos

(UTFPR)

Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr. Leandro Waidemam.

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pois toda fé Nele depositada, de alguma forma sempre foi retribuída, e não seria diferente na conclusão deste trabalho. O Senhor me guiou, orientou, por fim, me capacitou, tornou possível a realização deste sonho. Que sua luz seja sempre minha guia, e que este Pai seja sempre meu protetor, pois é nele em que me apoio, nos momento de dificuldade e de fraternidade.

Agradeço imensamente aos meus queridos pais, Fernando e Magali, meus maiores exemplos, por toda a paciência, por todo carinho, amor e dedicação que sempre me criaram, ensinando-me valores e princípios fundamentais para minha vida. Também agradeço ao meu melhor e mais velho amigo, meu irmão, Rafael, pelas conversas sinceras, dicas preciosas e pelas risadas mais genuínas. Por todos os momentos em que me apoiou e incentivou, que nossa amizade seja eterna. Saibam que cada conversa, cada mensagem, cada gesto, tudo, foi motivo para me alegrar e me sentir amado. Agora, espero que saibam também que cada conquista em minha vida, está dedicada a vocês, com muito amor.

A meus avós, pelos mimos e agrados e que sempre foram as vozes da experiência e de sabedoria em minha vida, guiando-me sempre com conselhos valorosos.

As amizades cultivadas em Campo Mourão, que direta ou indiretamente fizeram a diferença em minha vida. Aos colegas de turma, que vivenciaram risadas, tristezas, conversas, decepções, superações, noites intermináveis de estudo e com certeza muitas realizações, em especial aos amigos: Luizinho, Jorjão, Japa, Alda e os integrantes da Rep. Ressacada. Sem esquecer também dos tererés e estudos com os amigos: Bife, Brunão, Oswaldo, Schiavon, Sushi, Will, entre muitos outros que não caberiam aqui.

Agradeço pela companhia e doçura de sempre da minha namorada, Natália, que sempre me apoiou, ajudando-me a superar obstáculos. Com certeza você tornou essa caminhada muito mais suave e agradável. Muito obrigado!

Deixo meu agradecimento a família República Pelé Marreta, assim como a todos seu integrantes: Big, Cezinha, Coragem, Edinho, Japa, Pará, Popoto, Toddynho e Xarola que dividiram comigo bons momentos, e que estarão sempre na lembrança. Obrigado pela convivência.

A todos os colaboradores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campo Mourão, em especial, àqueles que contribuíram para minha formação acadêmica, incluindo minha orientadora neste trabalho Prof^a. Me. Eliana Fernandes dos Santos, pela confiança e orientação.

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

RESUMO

SARTORI, Guilherme. **Estudo de Estabilização de Solos para Fins de Pavimentação na Região de Campo Mourão** 2015. 54 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

Este trabalho tem como objeto de estudo os solos da região de Campo Mourão e possíveis soluções encontradas adicionando-se aditivos, como cimento e cal, para que este material possa ser utilizado em bases de pavimento, uma vez que por si só não apresentam valores mínimos exigidos pelas normativas vigentes. Portanto, estudou-se dosagens para que pudessem chegar em uma quantidade ideal de aditivo, unindo características técnicas válidas e custos mais interessantes para emprego *in loco*. Após a realização de diversos ensaios, chegou-se então a 3 dosagens que supriram as exigências da norma, sendo duas com cimento e uma outra utilizando cal, os teores encontrados foram respectivamente, 10, 13 e 5%. Após realizar uma análise econômica concluiu-se então que a solução que apresenta uma relação custo x benefício mais interessante é aquela com teor de cal igual a 5%.

Palavras-chave: Solos estabilizados. Solo-cimento. Solo-cal. Capacidade de suporte. Base de Pavimentos.

ABSTRACT

SARTORI, Guilherme. Soil Stabilization Study For The Purpose Of Flooring In Campo Mourao Region. 2015. 54 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

The object of study of this work is the soil from Campo Mourão region and possible solutions found by adding additives, such as cement and lime, so that this material can be used in pavement base, since that alone do not exhibit minima required by current regulations. Therefore, dosages were studied in order to get an optimal amount of additive, gathering the valid technical characteristics and the most interesting costs for job-site. After conducting several tests 3 dosages were found, these supply the requirements of the technical norm, two with cement and another using lime, the content found were, respectively, 10, 13 and 5%. After performing an economic analysis it was concluded that the solution presents a cost-benefit more interesting is that with lime content of 5 %.

Keywords: Soil stabilized. Soil-cement. Soil-lime. Supportability. Base of pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Estrutura com grãos isolados; (b) Estrutura Alveolar ou Favo de Mel.....	17
Figura 2: Composição dos pavimentos flexíveis	25
Figura 3 - Vista Superior do Local de Coleta do Material	33
Figura 4 - Vista do Local de Coleta do Material.....	34
Figura 5 - Início da Homogenização Solo Cimento.....	38
Figura 6 - Utilização do Extrator de CP's	39
Figura 7 - CP's na câmara úmida.....	40
Figura 8 - Prensa para Ensaio de Compressão Simples	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistema Unificado de Classificação dos Solos.....	22
Tabela 2 - Classificação dos Solos HRB	24
Tabela 3 - Variação à Compressão com Teor de Cimento	29
Tabela 4 - Normas Referentes aos Ensaios	36
Tabela 5 - Caracterização do Solo	42
Tabela 6 - Índice de Suporte Califórnia (CBR) Solo Cimento	43
Tabela 7 - Índice de Suporte Califórnia (CBR) Solo Cal	43
Tabela 8 - Resistência à Compressão Simples Solo Cimento aos 7 dias.....	44
Tabela 9 - Resistência à Compressão Simples Solo Cal aos 7 dias	45
Tabela 10 - Resumo Características Solo Cimento Para Uso da Anova	46
Tabela 11 - ANOVA para Dosagens de Solo Cimento.....	47
Tabela 12 - Resumo Características Solo Cimento Para Uso da Anova	47
Tabela 13 - ANOVA para Dosagens de Solo Cal.....	47
Tabela 14 - Comparativo Econômico das Dosagens	49
Tabela 15 - Custo Brita Graduada Simples Para Um Quilometro	50

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DER/PR	Departamento de Estradas e Rodagem do Paraná
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.1 Objetivos Específicos	14
3 JUSTIFICATIVA	15
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4.1 Solo	16
4.1.1 Estruturas do Solo	16
4.1.1.1 Solos Não – Coesivos	17
4.1.1.2 Solos Coesivos	17
4.2 Índices Físicos	18
4.3 Ensaios Para Caracterização dos Solos	19
4.3.1 Limites de Atterberg	20
4.3.1.1 Limite de Liquidez (LL)	20
4.3.1.2 Limite de Plasticidade (LP)	20
4.4.1.2 Índice de Plasticidade (IP)	21
4.4.2 Granulometria	21
4.5 Classificação dos Solos	21
4.5.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos	22
4.5.2 Sistema de Classificação HRB/TRB	23
4.6 Pavimentos	24
4.6.1 Bases do Pavimento	25
4.7 Estabilização do Solo para Pavimentação	26
4.7.1 Estabilização Mecânica	27
4.7.2 Estabilização Granulométrica	27
4.7.3 Estabilização Química	27
4.8. Cimento	27
4.8.1 Estabilização com Solo-Cimento	28
4.8.2 Dosagem Solo-Cimento segundo NBR 12253	29
4.9 Cal	30
4.9.1 Estabilização com Solo-Cal	30

5. METODOLOGIA.....	33
5.1 Materiais	33
5.2 Equipamentos	34
5.3 Métodos	35
5.3.1 Laboratório.....	35
5.3.1.1 Ensaio de Caracterização do Solo	36
5.3.1.2 Limite de Liquidez	36
5.3.1.3 Limite de Plasticidade	36
5.3.1.4 Granulometria por Peneiramento.....	37
5.3.1.5 Compactação.....	37
5.3.1.6 Índice de Suporte Califórnia (CBR)	38
5.3.1.7 Ensaio de Resistência à Compressão Simples	38
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	42
6.1 Caracterização dos Solos	42
6.2 Resultado dos Ensaio de Índice de Suporte Califórnia	43
6.3 Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Simples	44
Tabela 8 - Resistência à Compressão Simples Solo Cimento aos 7 dias.....	44
6.3 Análise Estatística.....	46
6.4 Análise Econômica.....	48
6.4.1 Custo de Sub-Base e Base Utilizando Solo Cimento e Solo Cal	49
6.4.2 Custo de Sub-Base e Base Utilizando Brita Graduada Simples	50
7 CONCLUSÕES.....	51
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

O solo, composto por sais minerais, é a camada mais superficial da crosta terrestre e apresenta inúmeras variações, devido ao que podemos chamar de fatores de formação, onde incluem-se: origem, relevo, clima, tempo e organismo. Tais fatores combinados são determinantes para a formação do solo, ressaltando-se ainda que a maior ou menor intensidade pela qual um ou mais desses fatores agem na formação do mesmo, influi diretamente para a sua caracterização.

O estudo de solos a partir da ótica do engenheiro civil visa o conhecimento destes para aplicação em obras, em alguns casos para o comércio, mas em sua grande maioria o uso do mesmo com a finalidade de suporte à suas construções, as comumente lembradas referem-se a fundações de edifícios, entretanto, o uso adequado do solo para a sustentação de pavimentos rodoviários é de suma importância, do ponto de vista econômico e de segurança.

Fazendo alusão ao conceito acima supracitado, o Brasil, devido ao seu extenso território, possui solos completamente distintos de região para região, que sofreram e sofrem influência dos fatores de formação, portanto é possível dizer que para algumas localidades o solo é ideal para alguma atividade, entretanto de baixa qualidade para outras.

Partindo deste pretexto, foi necessário pesquisar a respeito do solo da região de Campo Mourão – PR, situado no 3º Planalto Paranaense ou também Planalto de *Trapp* do Paraná (Figura 1), para que dessa forma fosse possível classificá-lo e interpretá-lo para o uso adequado do objeto de nosso estudo.

Conhecendo um dos tipos de solo de Campo Mourão, caracterizou-o e fez os ensaios necessário para identificar qual o melhor tipo de estabilização para este, com a finalidade de utilizá-lo como base de pavimento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o solo da região de Campo Mourão e o tipo de estabilização deste material com aditivos químicos, que possam lhe conferir maior estabilidade e resistência para fins de pavimentação, mais especificamente para a utilização como material de construção em camadas de Base dos Pavimentos. Verificar ainda, o custo aproximado destas misturas.

2.1 Objetivos Específicos

- Classificar o tipo de solo da microrregião de Campo Mourão – PR, onde será coletado o material;
- Apontar um aditivo químico estabilizante que seja mais adequado ao material desta microrregião, de forma a proporcionar uma mistura que atenda as especificações normativas para utilização em camadas de base dos pavimentos;
- Identificar e sugerir dosagens para a estabilização do solo com o aditivo químico mais adequado.

3 JUSTIFICATIVA

O uso alternativo de solos modificados quimicamente no Brasil tornou-se uma alternativa a partir da década de 40, quando devido ao crescimento acelerado do estado de São Paulo, foram iniciados os processos de pavimentação. Contudo, nesta época em algumas localidades o solo não apresentava boas características, obrigando os empreiteiros a buscarem material de melhor qualidade em locais distantes. A partir deste desafio, e baseado em estudos já avançados nos Estados Unidos, surgiu a ideia de estabilizar o solo com aditivos de fácil acesso, como o cimento e a cal, sendo o primeiro bem mais comum.

Atualmente, assim como naquela época, muitas vezes o solo encontrado próximo ao local da obra não é de boa qualidade, e por isso é que diferentes alternativas devem ser utilizadas a fim de suprir as principais deficiências de um determinado tipo de material. Ou seja, ao invés de fazer uma grande movimentação de material, que gera muitos custos operacionais, pode-se usar o solo local estabilizado, gerando economia em transporte e/ou compra de agregados, confeccionando assim camadas de base que atendam as especificações determinadas nas normas.

Portanto, é notório que o uso desse tipo de material pode ajudar muito nos custos e na logística de obras de pavimentação, sendo que neste trabalho será feito um estudo sobre a confecção deste tipo de solo, com dosagens adequadas, para uso em bases de pavimentos na região de Campo Mourão – PR.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Solo

O solo, como um dos materiais mais antigos empregados na construção civil, faz-se presente na maioria das obras de engenharia, sendo utilizado como base de suporte para estruturas de fundações, por isso então faz-se necessário o conhecimento de suas propriedades, para que possa ser feita uma previsão de seu comportamento diante das solicitações.

Os solos, no entendimento de Caputo (1983, pg.14), "são materiais que resultam do intemperismo ou meteorização das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química." Ainda segundo Caputo, entende-se por desintegração mecânica, ações de agentes como: água, temperatura, vento e vegetação. Enquanto que na decomposição química, o principal agente é a água e seus mecanismos de ataque, como: oxidação, hidratação, carbonatação. Cabe ainda ressaltar que as argilas representam o último produto da decomposição.

Na perspectiva de Das (2007, pg.1), o solo é definido como um agregado não cimentado de grãos minerais e matéria orgânica decomposta (partículas sólidas), com líquidos e gás nos espaços vazios entre as partículas sólidas. Sendo que o conhecimento de propriedades como origem, distribuição dos grãos, capacidade de drenagem, compressibilidade, resistência ao cisalhamento e capacidade de carga são de suma importância para que os engenheiros civis possam aplicar os conceitos de Mecânica dos Solos em obras.

4.1.1 Estruturas do Solo

Para DAS (2007 pg.63), a estrutura do solo é definida como o arranjo geométrico de partículas, umas em relação às outras. Essa estrutura pode ser afetada por muitos fatores, entre eles pode-se citar: forma, composição mineralógica das partículas, tamanho, natureza e composição da água do solo. De forma geral, este material pode ser dividido em duas classes: coesivos e não - coesivos.

4.1.1.1 Solos Não – Coesivos

Subdivida em duas categorias principais, alveolares e com grãos isolados, esta classe é caracterizada por apresentar elevado intervalo de índice de vazios.

De acordo com Das (2007, pg.64) solos com estruturas com grãos isolados, as partículas estão dispostas em posições estáveis, com cada partícula em contato com sua adjacente, sendo que a forma e distribuição do tamanho destas e suas posições relativas influenciam diretamente sobre a densidade do agrupamento, desta maneira, é possível então ter um grande intervalo de índice de vazios.

Já para solos com estrutura alveolar, materiais relativamente finos, como areias e siltes, formam pequenos arcos com correntes de partículas, de maneira a formar grandes índices de vazios. Nesta classe, carregamentos abruptos e/ou carga elevada, levam a estrutura à ruptura, resultando em recalques expressivos.

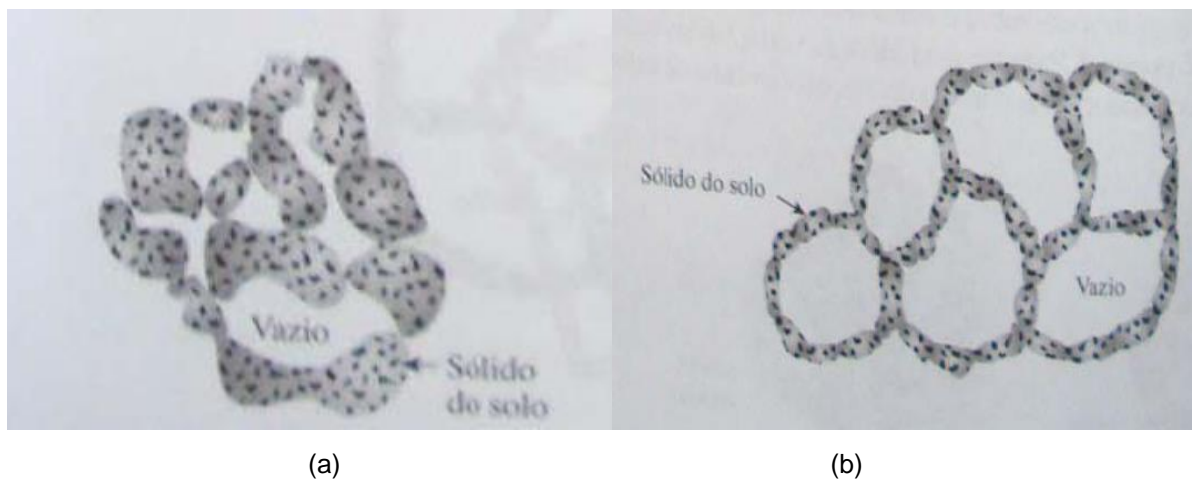


Figura 1 – (a) Estrutura com grãos isolados; (b) Estrutura Alveolar ou Favo de Mel

Fonte: (DAS BRAJAS, 2007)

4.1.1.2 Solos Coesivos

Para este tipo de solo os grãos são muitos finos, na maioria dos casos imperceptíveis a olho nu. Para uma melhor compreensão a respeito deste tipo de solo, é necessário saber quais forças atuam sobre as partículas de argila suspensas em água. Desta forma, segundo Vargas (1977), as partículas alcançam o estado disperso, onde as partículas podem permanecer em suspensão ou sedimentar lentamente. As partículas então ficam orientadas paralelas umas as outras e com estrutura dispersa. A partir de um potencial atrativo ocorre o processo de floculação,

onde no movimento das partículas, estas podem ser captadas umas pelas outras. Desta forma, existe uma influência da condição iônica da água, como também pela presença de cátions nas bordas das partículas de argila, relacionada diretamente ao potencial atrativo-repulsivo. Segundo Das (2007), existe um enfraquecimento da camada dupla ao redor da partícula, por parte dos íons, quando o sal é adicionado a uma suspensão de argila em água, dispersa anteriormente. Por isso, então, forma-se uma estrutura floculada, assim, depósitos de argila formados no mar são altamente floculados. As argilas com este tipo de estrutura apresentam um alto índice de vazios e pouco peso.

4.2 Índices Físicos

Para Pinto (2002) o volume total de um solo é constituído por três fases: partículas sólidas, água e ar. Comumente, chamam-se as fases de água e ar de vazios. Para a determinação do comportamento de um solo, é necessário conhecer a relação proporcional que existe entre essas três fases. Ainda segundo Pinto (2002), as quantidades de água e ar são as únicas que variam, uma vez que as partículas de solo permanecem as mesmas, alterando apenas seu estado.

Suas propriedades estão ligadas diretamente ao estado em que se encontram, como exemplo Pinto (2002) cita, quando é o volume de vazios que diminui, a resistência do material aumenta.

Sabendo então, que o estado em que o solo se encontra é condição fundamental para apontar seu comportamento, alguns índices foram criados para relacionar os volumes e pesos das três fases supracitadas. Estes são de suma importância no estudo das propriedades do solo.

Umidade (w): a umidade de um solo pode ser definida como sendo a razão entre o peso da água contida em um determinado volume de solo úmido e o peso seco.

Índice de vazios (e): relação entre o volume de vazios e o volume das partículas sólidas. Não pode ser determinado diretamente, é necessário ser calculado através de outros índices.

Porosidade (η): razão entre o volume de vazios e o volume total da amostra de solo. Sempre é expressa em porcentagem.

Grau de Saturação (S): relação entre o volume de água e o volume de vazios. Um valor igual a 0%, representa um solo seco, enquanto que 100% um solo saturado.

Peso específico natural ou peso específico (γ_n): razão entre o peso total do solo e seu volume total. Para casos de compactação, usa-se o termo peso específico úmido.

Peso específico aparente seco (γ_d): relação entre o peso dos sólidos e o volume total. Este valor corresponde ao peso específico que o solo teria, caso viesse a ficar seco. Depende do peso específico natural e da umidade.

Peso específico aparente saturado (γ_{sat}): peso específico do solo caso esse tornasse-se saturado sem variação de volume. Pouca aplicação prática.

Peso específico aparente submerso (γ_{sub}): usado para determinação de tensões efetivas, representa o peso específico efetivo do solo quando submerso.

Compacidade (CR): o estado natural de um solo não coesivo (areia, pedregulho) define-se pelo grau de compacidade ou densidade relativa.

4.3 Ensaio Para Caracterização dos Solos

De acordo com o comportamento do solo segundo a ótica da engenharia civil, solos diferentes com características similares podem ser classificados em grupos e subgrupos através de sistemas de classificação, que abordam uma linguagem comum para expressar de maneira concisa, sem descrições detalhadas, diz Das (2007).

Para a criação de tais parâmetros, Vargas (1977) afirma que recorreu-se a algumas de suas propriedades físicas mais imediatas como: granulometria,

plasticidade, atividade de fração fina dos solos e propriedades relacionadas com a compactação e consistência do mesmo.

A partir de estudos realizados pelo Engenheiro Atterberg, o próprio, em 1908, estabeleceu limites de consistência, para caracterizar as mudanças entre os estados desta. Casagrande, posteriormente então, adaptou os procedimentos propostos por Atterberg afim de descrever a consistência de solos com grãos finos e teor de umidade variável (DAS, 2007). Com isso, foi possível obter quatro estados básicos do solo, baseado em seu teor de umidade : sólido, semi-sólido, plástico e líquido.

4.3.1 Limites de Atterberg

4.3.1.1 Limite de Liquidez (LL)

A determinação do limite de liquidez (LL) é feita pelo aparelho de Casagrande (figura 1), que consiste em um prato de latão em forma de concha, sobre um suporte de ebonite. Por meio de um excêntrico, imprime-se ao prato repetidamente, quedas de altura de 1 cm e intensidade constante (CAPUTO, 1983, p.54).

Segundo Das(2007), o limite de liquidez é definido como o teor de umidade no ponto e transição do estado plástico para o estado líquido. No Brasil, a padronização deste ensaio é realizada pela NBR 6459 (1984).

4.3.1.2 Limite de Plasticidade (LP)

Este outro parâmetro, é determinado pelo cálculo da porcentagem de umidade para a qual o solo começa se fraturar quando se tenta moldar um cilindro de 3 mm de diâmetro e de 10 cm de comprimento. É realizado manualmente por repetidos rolamentos da massa de solo sobre a placa de vidro despolido (figura 2). No Brasil este ensaio é padronizado pela NBR 7180/1984.

4.4.1.2 Índice de Plasticidade (IP)

É o valor correspondente entre a diferença do limite de liquidez e o limite de plasticidade ($IP = LL - LP$). Para Caputo (1983), a zona em que o terreno se encontra no estado plástico, máximo para as argilas e nulo para areias, fornece um critério para se ajuizar do caráter argiloso de um solo. Assim quanto maior o IP, mais plástico será o solo.

4.4.2 Granulometria

Segundo os entendimentos de Caputo(1983), diante as dimensões de suas partículas, as frações constituintes dos solos recebem suas devidas denominações. Segundo a ABNT, elas podem ser classificadas na escala granulométricas a seguir:

- Pedregulho: conjunto de partículas cujas dimensões (diâmetros equivalentes) estão compreendidas entre 76 e 4,8 mm;
- Areia: entre 4,8 e 0,05 mm;
- Silte: entre 0,05 e 0,005 mm;
- Argila: inferiores a 0,005 mm.

4.5 Classificação dos Solos

Diante do que já foi supracitado em relação aos solos, é fácil perceber que existem inúmeras variações dos solos, o que dificulta sua caracterização de região para região, e é por isso que sistemas de classificação foram criados, indicando características geotécnicas semelhantes para determinados grupos de solos.

Cada sistema de classificação leva em conta um aspecto do solo, há um que leva em conta a origem dos solos, outro com base na textura, àquele que classifica segundo aspectos visual e tátil, pedologia e ainda um que leva em consideração parâmetros geotécnicos do solo.

Contudo, segundo Caputo (1984), existem dois principais sistemas de classificação, sendo o: *Unified Classification System – U.S.C* (Sistema Unificado de

Classificação), idealizado por A. Casagrande e a classificação *Transportation Research Board* TRB, antigo (HRB) *Highway Research Board*, que é o mais empregado atualmente para uso em estradas.

4.5.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos

Segundo Caputo (1984), de maneira geral, os solos são classificados em três grupos:

- Solos grossos - aqueles cujo diâmetro da maioria absoluta dos grãos é maior que 0,074 mm (mais que 50% em peso, dos seus grãos, são retidos na peneira nº 200).
- Solos finos - aqueles cujo diâmetro da maioria absoluta dos grãos é menor que 0,074 mm.
- Turfas - solos altamente orgânicos e extremamente compressíveis.

Neste primeiro grupo enquadram-se pedregulhos, areias e solos com pequenas quantidades de materiais finos. Para o segundo grupo, temos solos mais finos de baixa ou alta compressibilidade. E para o último grupo, temos solos de regiões pantanosas e com alta taxa de decomposição vegetal acumulada.

Tabela 1 - Sistema Unificado de Classificação dos Solos

SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS(U.S.C.S.)		
Classificação Geral	Tipos Principais	Símbolos
SOLOS GROSSOS (Menos que 50% passando na # 200)	Pedregulhos ou Solos	GW, GP, GM e GC
	Pedregulhosos	
	Areias ou Solos Arenosos	SW, SP, SM e SC
SOLOS FINOS (Mais que 50% passando na #200)	Siltosos ou Argilosos	Baixa Compressibilidade (LL < 50) ML, CL e OL
		Alta Compressibilidade (LL > 50) MH, CH e OH
SOLOS ALTAMENTE ORGÂNICOS	Turfas	Pt

Fonte: ADAPTADO CAPUTO (1988)

4.5.2 Sistema de Classificação HRB/TRB

Nesse sistema, os solos são reunidos em grupos e subgrupos em função dos resultados de alguns ensaios, sendo eles: Granulometria por Peneiramento; Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, assim como também o índice IG, que é um número inteiro variante entre 0 a 20, cuja função é determinar a capacidade de suporte do terreno, onde 0, significa ser um excelente solo para a fundação de um pavimento e 20, um material muito ruim.

$$\mathbf{IG = 0,2 * a + 0,005 * a * c + 0,01 * b * d, \text{ onde:}}$$

a = % do material que passa na peneira de nº 200, menos 35; caso esta % for >75, adota-se a = 40; caso esta % seja < 35, adota-se a = 0;

b = % do material que passa na peneira de nº 200, menos 15; caso esta % for >55, adota-se b = 40; caso esta % seja < 15, adota-se b = 0;

c = valor de limite de liquidez (LL) menos 40; caso o LL > 60%, adota-se c = 20; se o LL < 40%, adota-se c = 0;

d = valor de índice de plasticidade (IP) menos 10; caso o IP > 30%, adota-se d = 20; se o IP < 10%, adota-se d = 0;

Os valores de "a", "b", "c" e "d" deverão ser expressos em números inteiros e positivos, assim como o valor de IG.

Tabela 2 - Classificação dos Solos HRB (continua)

Classificação Geral	Materiais Granulares (35% ou menos passando pela peneira nº 200)							Materiais Siltosos e Argilosos (+ 35% passando pela #200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
% passante nas peneiras	50 máx										
2,00mm	30 máx										
0,42 mm	50 máx	50 máx	51 mín								
0,74 mm	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Características da fração passante na peneira 0,42mm											
Limite de Liquidez	-	-	-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Limite de Plasticidade	6 máx	6 máx	NP	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 máx	11 mín
Índice do grupo (IG)	0	0	0	0	0	< 4	< 4	< 8	< 12	< 16	< 20
Materiais Predominantes	Pedra Britada, pedregulho e areia		Areia Fina	Areia e Areia Siltosa ou Argilosa				Solos Siltosos		Solos Argilosos	
Comportamento Geral	Excelente a Bom							Regular a Mal			

Fonte: ADAPTADO GRECO (2004)

Como demonstrado na tabela acima, os solos granulares compõe os grupos A-1, A-2, A-3, e os solos finos, os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7 e subdivisões.

4.6 Pavimentos

Um pavimento é considerado um sistema laminar formado por várias camadas de espessura constante constituídas por diferentes materiais, apoiados numa fundação, composta pelo maciço natural, cuja qualidade pode ser melhorada.

Os pavimentos são divididos em três categorias, os semi-rígidos, que serão nosso principal objeto de estudo, os flexíveis e os rígidos.

Os flexíveis são revestidos com materiais betuminosos ou asfálticos, ou seja, apresentam camadas compostas por misturas betuminosas, assim como também inferiormente são compostos por uma ou mais camada de material granular, todo esse conjunto apresenta como principal intenção a de suportar/acomodar a flexão que o tráfego exerce sobre tal estrutura.

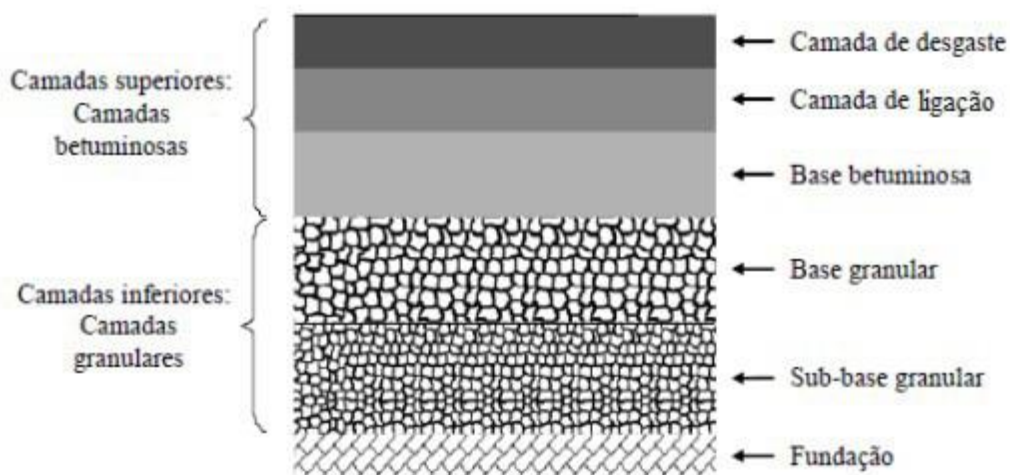


Figura 2: Composição dos pavimentos flexíveis

Já os semi-rígidos, são uma situação intermediária entre os flexíveis e os rígidos e diferem-se pois apresentam a base da estrutura executada com adição de cimento, cal. Devido ao aumento de rigidez que estas adições proporcionam e conseqüentemente o aumento do módulo de elasticidade, esta base absorve parte da tração, e por isso resiste razoavelmente a este tipo de esforço.

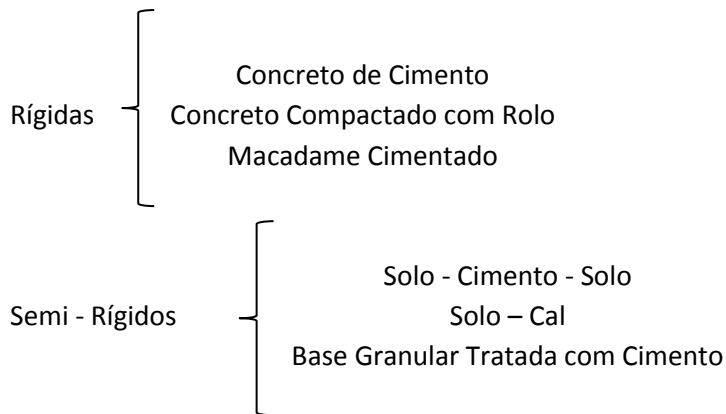
Os pavimentos rígidos por sua vez apresentam um revestimento constituído por placas de Concreto de Cimento Portland. Devido a essa composição, estes apresentam Modulo de Elasticidade mais elevado do que os supracitados, e são capazes de distribuir a carga sobre uma área relativamente maior do subleito, isto deve-se ao fato de que a própria placa de concreto fornece maior capacidade estrutural ao pavimento.

4.6.1 Bases do Pavimento

A base é uma camada da estrutura do pavimento executada sobre a sub-base (deve ser usada quando não for aconselhável executar a base diretamente sobre o leito) ou sub-leito devidamente regularizado e compactado. Esta camada deve

resistir a esforços provenientes de veículos, distribuindo-os à sua camada subjacente. É sobre esta camada que será construído o revestimento asfáltico.

As bases, de maneira geral, podem ser agrupadas dessa maneira:



Órgãos fiscalizadores como o DNIT e o DER/PR apresentam especificações que os solos devem apresentar para que estes possam ser utilizados como base para um pavimento. Segundo o DNIT, os valores de expansão de um solo para tal fim deve ser menor/igual a 0,5%, enquanto que o CBR apresentado pelo mesmo material deve atingir valores superiores a 80%.

Dessa forma, é de se esperar que os solos naturais não alcancem por si só valores altos de CBR, daí então têm-se a necessidade de incorporar aditivos ao solo, para que este possa enfim ser empregado como base.

4.7 Estabilização do Solo para Pavimentação

A pavimentação envolve diretamente o uso de solos para diferentes camadas de sua composição. Para melhor aproveitamento econômico e de desenvolvimento da obra, o ideal, seria utilizar o solo já existente no local a ser realizado a obra. Contudo, muitas vezes os solos presentes *in loco* não atendem as especificações mínimas exigidas para a utilização.

Por isso então, surgiu-se a necessidade de criar métodos para tornar o solo mais adequado para sua aplicação, ou seja, a estabilização deste material. Para Senço (2001), estabilizar um solo significa dar a ele condições de resistir a

deformações e ruptura durante todo o período em que sua função exija atender a tais características. Ainda segundo o autor, as principais características que um solo estabilizado deve apresentar é resistência ao cisalhamento e à deformação, para que, quando sujeito a tensões, estes resistam sem que se rompam.

Existem então três principais métodos para a estabilização: mecânico, granulométrico e o químico.

4.7.1 Estabilização Mecânica

Este método de estabilização baseia-se na correção granulométrica do solo, a partir de processos de compactação, pois esta também é uma maneira de conferir ao solo uma melhor densificação e alcançar o valor de umidade ótima. Este método é comum no decorrer de uma obra, na execução das diferentes camadas de um pavimento e é complementar a outros métodos de estabilização.

4.7.2 Estabilização Granulométrica

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

4.7.3 Estabilização Química

Esta outra técnica visa a melhoria das propriedades físicas e mecânicas do solo, por meio de alteração da estrutura do mesmo com o uso de aditivos, que podem ser dos mais variados tipos e nem sempre são materiais comuns ao uso da construção civil. Como aditivos para estabilização química, podemos citar: cimento, cal, produtos industrializados como o CON-AID®, PERMA-ZYME®, entre outros.

4.8. Cimento

No Brasil, o mercado dispõe de 8 opções que atendem aos mais variados tipos de obras. Segundo ABCP, o cimento diferencia-se de acordo com a proporção de clínquer e sulfatos de cálcio, pozolanas, material carbonático, entre outros que podem ser acrescentados durante o processo de moagem. Diferem-se também em função de propriedades intrínsecas, como a cor, resistência, etc.

4.8.1 Estabilização com Solo-Cimento

Para Marques (2003 apud Feltrin, 2008), muitas vezes as misturas de solo com cimento são confundidas e caracterizadas de maneira errônea, sendo todas elas chamadas de solo cimento. Contudo existem três tipos de misturas envolvendo solo e algum teor de cimento. Sendo que estas são caracterizadas assim:

- Mistura Solo Cimento: é o produto originado a partir da compactação e cura da mistura envolvendo solo, cimento e água, com a intenção de satisfazer critérios de estabilidade e durabilidade.
- Solo modificado com cimento: mistura que possui pequenas quantidades de cimento (1 a 5%), visando alterar algumas propriedades físicas como baixar o índice de plasticidade através do aumento do LP e da diminuição do LL.
- Solo cimento-plástico: material endurecido, com consistência similar a de uma argamassa. Este apresenta uma mistura de solo, cimento e água em quantidade suficiente para a compactação e completa hidratação do cimento, apresenta ainda maiores quantidades de cimento.

Então, para que haja uma boa aceitação da mistura do solo com o cimento, é preciso quantificar corretamente a quantidade de cimento a ser adicionado, sendo que esta varia conforme a qualidade do solo utilizado, além do teor de umidade ótima. A dosagem pode ser determinada através do Método Simplificado, uma metodologia empírica, que utiliza tabelas e ábacos, que estima o teor para cada tipo de solo, levando em consideração a sua resistência à compressão e teor de água (SENÇO, 2001). Seguindo ainda o exposto pelo autor, é interessante ressaltar que o material que deve ser mais controlado é o solo, devido a sua heterogeneidade.

Tabela 3 - Variação à Compressão com Teor de Cimento

Solo	Teor de Cimento (%)	Resistência à Comp. aos 7 dias (MPa)	Densidade Seca (g/cm ³)	Teor de Água (%)
Argila Siltosa	7	2,40	1,78	16
	10	2,74	1,78	
	13	3,09	1,78	
Argila Arenosa	7	1,78	1,87	14
	10	2,62	1,89	
	13	3,64	1,89	
Areia Argilosa	7	1,65	1,78	12
	10	1,94	1,82	
	13	2,69	1,84	
Areia de Granulometria Uniforme	7	1,44	1,78	10
	10	2,81	1,84	
	13	5,88	1,89	
Seixo Mal Graduado	7	1,10	1,99	10
	10	2,47	2,01	
	13	3,84	2,04	

Fonte: ADAPTADO SENÇO (2001)

4.8.2 Dosagem Solo-Cimento segundo NBR 12253

Para Nascimento (1991), após anos de experiência brasileira, passou-se a conhecer melhor os solos e quais desses são mais adequados para serem utilizados nas bases e sub-bases com adições de cimento. A princípio, todos os tipos de solo podem ser estabilizados com cimento, contudo, alguns tornam-se inviáveis economicamente devido ao alto teor de cimento que deve ser adicionado à mistura. Visto isso, surgiu a necessidade de criar um novo procedimento para que houvesse uma dosagem mais precisa.

Este novo método, é apresentado pela NBR 12253, e segue a ordem:

- Ensaios preliminares do solo;
- Escolha do teor de cimento para ensaio de compactação;
- Execução do ensaio de compactação;

- Determinação do teor de cimento para ensaio de compressão simples – por meio de ábaco;
- Moldagem de 3 corpos de prova (no mínimo) para o teor de cimento selecionado;
- Execução do ensaio de compressão simples (MB 03361 - NBR 12025);
- Resultado da dosagem.

4.9 Cal

A cal hidratada, um material extremamente fino e leve é muito utilizada na construção civil como aglomerante. O seu uso como aditivo em solos para fins de estabilização deve-se ao fato desta ser um excelente reagente, que torna o solo impermeável e aplicável para uso em bases de pavimentos urbanos e rodoviários, melhorando assim a relação custo x benefício, que visa aproveitar o solo e conferir-lhe maior capacidade de resistir a carregamentos e intempéries.

4.9.1 Estabilização com Solo-Cal

Uma base ou sub-base executada com o produto derivado da mistura entre solo e cal, devidamente homogeneizado, compactado e recoberto com uma camada de rolamento, deve apresentar capacidade de suportar as cargas verticais provenientes do tráfego, para que haja uma boa distribuição destas cargas, de maneira a não prejudicar o desempenho do pavimento (SENÇO, 2001).

Sabe-se ainda que ao realizar tal mistura com teor de umidade ótima, ocorrem algumas reações químicas que promovem alterações físicas nos mesmos. Entre elas podemos citar: aumento da resistência à compressão, o mesmo ocorre com a capacidade de carga, criação de uma barreira resistente à penetração de água, entre outros.

Alguns fatores possuem influência sobre este processo de estabilização, podendo ser benéficos ou maléficos. A temperatura influi de forma positiva quando esta está em torno de 60°, fazendo com que as resistências evoluem rapidamente, enquanto que a baixas temperaturas o ganho de resistência é bem lento. A cal a ser utilizada também é um fator preponderante, onde as cales hidratadas podem conferir

ao material maiores valores de resistência. Solos mais finos também apresentam melhores resultados para a estabilização com cal.

Assim como para a mistura solo-cimento, esta é avaliada a partir do ensaio Índice de Suporte Califórnia, com os valores de CBR. Entretanto, para este tipo de mistura, no Brasil, ainda não existem metodologias para a dosagem, e por isso, por vezes usa-se dosagens experimentais.

5. METODOLOGIA

5.1 Materiais

Para a realização dos ensaios relacionados ao comportamento do solo e a resistência de sua mistura com o cimento e cal, conforme normas vigentes, serão necessários os seguintes:

- Solo coletado *in situ*;
- Cimento Portland;
- Cal virgem.

O solo será coletado em uma região onde estão sendo realizadas obras de pavimentação na cidade de Campo Mourão, mas especificamente na BR – 158.

Figura 3 - Vista Superior do Local de Coleta do Material



Fonte: Google Earth – Astrium Dados do Mapa @2015 Google

Figura 4 - Vista do Local de Coleta do Material



Fonte: Google Maps

5.2 Equipamentos

- Aparelho de Casagrande e Cinzel;
- Placa de Vidro de superfície esmerilhada com 30 cm de lado;
- Gabarito cilíndrico de 3mm de diâmetro e 100mm de comprimento;
- Estufa com capacidade de manter temperaturas entre 105 a 110°C;
- Cápsula de Porcelana com 120mm de diâmetro;
- Balança que permita pesar de 200g até 10kg com resoluções de 0,01g e sensibilidade compatíveis;
- Cilindro metálico pequeno (cilindro de Proctor) compreendendo o molde cilíndrico, a base e o cilindro complementar de mesmo diâmetro (colarinho);: (50 + 0,2) mm e altura (100 ± 0,5) mm;
- Soquete pequeno, consistindo em um soquete metálico com massa de (2500 ± 10)g e dotado de dispositivo de controle de altura de queda (guia) de (305 ± 2) mm
- Máquina de ensaio à compressão simples.

5.3 Métodos

Neste item serão apresentadas as metodologias a serem empregadas para a determinação de dos materiais envolvidos na pesquisa e obtenção de resultados, assim como os ensaios e procedimentos que serão necessários para a conclusão do trabalho.

Etapa I – Através de pesquisas na internet e em livros, averiguar a real necessidade do uso da estabilização dos solos para fins de pavimentação, especificamente em camadas de base. Encontrar suas problemáticas, suas vantagens e quais os principais fatores que mais afetam sua aplicação e utilização. Pesquisar as normas técnicas vigentes (DNIT e DER/PR) de forma a verificar quais as especificações técnicas a serem atendidas para uso destes materiais em camadas de base dos pavimentos.

Etapa II - Determinação do local e coleta in situ de amostras de solo para o uso posterior em ensaios.

Etapa III – Realização de ensaios geotécnicos necessários para a classificação HRB (classificação mais usual dos solos em alusão à pavimentação) do solo coletado.

Etapa IV – Realização dos ensaios geotécnicos (Compactação e CBR) necessários para a verificação se este material por si só atende as especificações técnicas para o emprego em camadas de base dos pavimentos;

Etapa V – Após a avaliação da necessidade do uso de aditivo, realizar estudos de dosagem para o solo analisado de maneira a permitir o emprego do mesmo nas camadas de base dos pavimentos atendendo as normas técnicas vigentes.

5.3.1 Laboratório

Ao chegar no laboratório, o solo foi seco ao ar livre e destorrado. A princípio, algumas amostras foram utilizadas para os ensaios de caracterização e determinação da umidade higroscópica, utilizando do método da frigideira. Toda a preparação para as amostras, seguiu a padronização da NBR 6457 (1983).

5.3.1.1 Ensaios de Caracterização do Solo

Os ensaios foram realizados com o intuito de classificar o solo segundo a HRB (Highway Research Board), Tabela 2, sempre respeitando as normas vigentes para o respectivo ensaio, a relação entre normativa e ensaio pode ser observada na Tabela 4.

Tabela 4 - Normas Referentes aos Ensaios

Ensaio	Norma ABNT
Preparação das Amostras de Solo	NBR 6457/86
Limite de Liquidez	NBR 6459/84
Limite de Plasticidade	NBR 7180/84
Granulometria	NBR 7181/84
Compactação	NBR 7182/86 e NBR 12023/92

Fonte: Autor

5.3.1.2 Limite de Liquidez

Para a realização deste ensaio, foi utilizado o aparelho de Casagrande. No início deste, com o auxílio de um recipiente, colocou-se uma porção de solo passante na peneira 40 (0,42mm) e adicionou-se água misturando até atingir uma pasta homogênea entre os materiais. Após este procedimento, colocamos esta mistura no aparelho de Casagrande, a partir daí seguiu-se o que é pedido na NBR 6459/84.

Determinou-se então a umidade através da quantidade de golpes necessários até o fechamento das bordas inferiores da ranhura ao longo de aproximadamente 13mm de comprimento. Foram obtidos 5 valores para este ensaio.

5.3.1.3 Limite de Plasticidade

Segundo NBR 7180/84 neste ensaio foram realizados rolamentos sucessivos sob uma placa de vidro despolido até que a massa de solo alcançou o formato cilíndrico de 100mm de comprimento e aproximadamente 3mm de espessura. Após alcançar tais medidas, colocou-se as partes deste cilindro em um recipiente para determinação da umidade.

Teve-se atenção especial para que os cilindros que se fragmentam com

menos de 3mm de espessura, assim como também para aqueles cilindros onde atingiram 3mm sem se fragmentarem. Nestes casos, foi necessário a realização do ensaio novamente.

Ao todo, serão realizadas três amostras para este ensaio.

5.3.1.4 Granulometria por Peneiramento

Primeiramente, a preparação das amostras para este ensaio devem seguir as orientações da NBR 6457/86.

Iniciou-se o ensaio então passando o material na peneira nº10 (2,0mm). O material grosso retido nessa etapa foi lavado para que todas as partículas de materiais finos fosse retiradas. O processo também foi repetido utilizando a peneira nº 200 (0,075mm). As amostras então foram secas em estufa a uma temperatura de aproximadamente 105°C.

Com as amostras secas, o peneiramento teve início. Este procedimento consistiu em agitar as peneiras manualmente ou com auxílio de equipamento adequado, posteriormente verificou-se e pesou-se a quantidade de material retido em cada peneira. As peneiras a serem utilizadas são de 50; 38; 25; 19; 9,5; 4,8; 2,0; 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15; 0,075mm;

5.3.1.5 Compactação

O ensaio de compactação, assim como os outros, seguiu sua respectiva norma, NBR 12023/1992. Cabe ressaltar que foi considerado o método A, da norma já citada, que aplica-se para solos que possuem 100% de partículas passantes na peneira 4, de modo que os grãos sejam menores que 4,8mm. Foram realizadas 3 amostras para cada dosagem determinada, conforme determinado em norma.

Após pesadas e separadas, foram calculadas e pesadas as dosagens de cimento e cal para cada CP, foi separada também uma pequena amostra para a obtenção da umidade, através do método da frigideira, para determinar em qual condição o solo se encontrava no momento de realização do ensaio. Estando então, o solo na umidade ótima, passou-se a misturá-lo juntamente com os aditivos até que esta mistura tornasse-se homogênea.

Figura 5 - Início da Homogeneização Solo Cimento



Fonte: Autor

Depois de homogeneizar a mistura, a mesma, foi colocada no cilindro de Proctor, e a partir daí foi compactada conforme a norma, utilizando o soquete pequeno, realizando 26 golpes por camada, em um total de 3 camadas. Após a compactação do material, foi necessário utilizar a régua biselada para retirar o excesso de material, que não pode ultrapassar 10mm após a remoção do colarinho.

5.3.1.6 Índice de Suporte Califórnia (CBR)

Após remover o colarinho e preparar as amostras, estas foram colocadas em imersão no tanque durante 4 dias. E após esta embebição, os corpos de prova ficaram escoando por 15 minutos e depois encaminhados para a prensa do CBR, para que pudessem ser feitas as leituras do ensaio, apresentadas no capítulo 6.

O mesmo procedimento repetiu-se para as amostras de solo cal, e os resultados obtidos encontram-se também no capítulo 6.

5.3.1.7 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Então, após a determinação do CBR, com o auxílio do extrator de corpo de prova, retira-se o CP e leva-o até a câmara úmida, para que possa ter um tempo de cura igual a 7 dias.

Figura 6 - Utilização do Extrator de CP's



Fonte: Autor

Figura 7 - CP's na câmara úmida



Fonte: Autor

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 Caracterização dos Solos

A caracterização física do solo foi feita através dos ensaios de Granulometria, Limite de Liquidez(LL) e Limite de Plasticidade(LP), respeitando sempre as respectivas normas de cada um. Com esses resultados, foi possível definir o Índice de Plasticidade(IP) e também o IG, para definir em qual classe o solo se enquadra, segundo a Classificação HRB. Diante desses resultados foi possível criar essa tabela para análise.

Tabela 5 - Caracterização do Solo

Característica	Amostra
Limite de Liquidez (LL) %	53,8
Limite de Plasticidade (LP) %	32,8
Índice de Plasticidade (IP) %	21
% Passante na #200	91
IG	19
Umidade Ótima %	28,7
Classificação HRB	A 7-5

Fonte: Autor

Voltando então à Tabela 2, e com o auxílio dos dados apresentados na Tabela 4, é possível, pela Classificação HRB, definir que o solo é um A7-5, o que representa uma argila siltosa.

Para então, determinar as dosagens adequadas para o tipo de solo estudado, foi utilizado o método da NBR 12253, onde através de um ábaco, determina-se os

valores ideais de dosagens, que para este caso foi de 10%, portanto, para efeito de estudo e comparação, foi utilizado além desta dosagem, uma acima e uma abaixo, sendo determinado assim as dosagens de 7%, 10% e 13%, valores estes coincidentes com os apresentados na Tabela 3, de Senço 2001, para o mesmo tipo de solo. Desta forma, foi utilizado para a moldagem dos corpos de prova e posterior ensaio de resistência à compressão simples as dosagens de cimento conforme supracitado, enquanto que para fins comparativos, as dosagens de cal foram 3%, 5% e 7%, baseadas no estudo do Centro de Pesquisas Rodoviárias, Grupo CCR, trabalho publicado em 2013.

6.2 Resultado dos Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

Com os resultados dos ensaios de CBR, foi possível concluir que todas as amostras estudadas poderão ser utilizadas como material de base, já que conforme norma ES 143/2010 do DNIT, para que misturas de solos com aditivos possam ser utilizadas em bases de pavimento, estas deverão alcançar um valor mínimo de CBR igual a 80%. Portanto, seguem nas Tabelas 6 e 7, os valores obtidos das amostras e respectivos resultados.

Tabela 6 - Índice de Suporte Califórnia (CBR) Solo Cimento

Teor de Cimento	CP	CBR (%)
7%	1	89,1
7%	2	83,6
7%	3	87,2
10%	1	99,5
10%	2	103,4
10%	3	101,7
13%	1	115,6
13%	2	117,9
13%	3	108,2

Fonte: Autor

Do mesmo modo, apresentam-se também os resultados obtidos para as misturas de solo cal.

Tabela 7 - Índice de Suporte Califórnia (CBR) Solo Cal

Teor de Cal	CP	CBR (%)
3%	1	72,5
3%	2	64,2

3%	3	73
5%	1	81,7
5%	2	86,9
5%	3	80,4
7%	1	89,9
7%	2	88,7
7%	3	91,4

Fonte: Autor

6.3 Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Tabela 8 - Resistência à Compressão Simples Solo Cimento aos 7 dias

Teor de Cimento	CP	Ø CP (mm)	ÁREA CP (cm ²)	FORÇA (kN)	TENSÃO (MPa)	MÉDIA TENSÃO (MPa)	DESVIO PADRÃO
7%	1	99,7	7806,9	15,7	2,01	2,00	0,071
7%	2	99,7	7806,9	16,1	2,06		
7%	3	99,7	7806,9	15,0	1,92		
10%	1	99,7	7806,9	21,0	2,69	2,83	0,027
10%	2	99,7	7806,9	24,5	3,14		
10%	3	99,7	7806,9	20,7	2,65		
13%	1	99,7	7806,9	28,7	3,68	3,75	0,077
13%	2	99,7	7806,9	29,9	3,83		
13%	3	99,7	7806,9	29,3	3,75		

Fonte: Autor

A partir da análise da Tabela 8, permite-se dizer que os teores de cimento misturado ao solo igual a 10% e 13%, satisfizeram a condição de uso deste material para emprego em camada de base e sub-base de pavimentos, alcançando uma média superior à mínima recomendada pela Norma 143/2010 – DNIT, de 2,1 MPa para a resistência à compressão simples aos 7 dias. Da mesma forma, ocorreu com a mistura de solo cal com teor de 5%, onde esta alcançou uma média de 2,26MPa.

Ainda, compreendendo melhor a Tabela 8, pode-se observar um valor em destaque, que refere-se ao CP que se afastou em mais de 10% da média calculada, e que, portanto, conforme NBR 12253/92, deve ser desconsiderado no cálculo da média, que pode ser justificado devido ao fato de aumentar significativamente o valor do desvio padrão, tornando assim a amostra incoerente com o ensaio. O mesmo também ocorre para valores da Tabela 9.

Tabela 9 - Resistência à Compressão Simples Solo Cal aos 7 dias

Teor de Cal	CP	Ø CP (mm)	ÁREA CP (cm ²)	FORÇA (kN)	TENSÃO (MPa)	MÉDIA TENSÃO (MPa)	DESVIO PADRÃO
3%	1	99,7	7806,9	12,6	1,61	1,37	0,243
3%	2	99,7	7806,9	10,8	1,38		
3%	3	99,7	7806,9	8,8	1,13		
5%	1	99,7	7806,9	17,4	2,23	2,26	0,032
5%	2	99,7	7806,9	17,6	2,25		
5%	3	99,7	7806,9	17,9	2,29		
7%	1	99,7	7806,9	13,8	1,77	1,82	0,112
7%	2	99,7	7806,9	13,6	1,74		
7%	3	99,7	7806,9	15,2	1,95		

Fonte: Autor

Figura 8 - Prensa para Ensaio de Compressão Simples



Fonte: Autor

Ainda, segundo a norma ES-P 11/05 do DER/PR o material que alcançar valores maiores que 1,2MPa e menores que 1,5MPa no ensaio de resistência à compressão simples, só pode ser utilizado como sub-base, e aqueles que alcançarem valores a partir de 1,5MPa já pode ser usado para base.

Portanto, de acordo com os ensaios e estudos apresentados, todas as dosagens suprem o mínimo necessário para serem utilizados como sub-base, e apenas a dosagem de 3% de cal no solo, não atingiu o mínimo para base conforme

ES-P 11/05 DER/PR.

Apesar então das amostras alcançarem resultados mais satisfatórios diante desta norma, é mais fiável seguir a 143/2010 DNIT, pois além de mais criteriosa, esta é válida para todo o território nacional.

6.3 Análise Estatística

Para tornar o estudo mais verdadeiro, fez-se uma Análise de Variância (ANOVA), com o intuito de validar uma das hipóteses a seguir:

- H_0 : todas as médias dos corpos de prova são iguais;
- H_1 : pelo menos uma das médias é diferente;

Para a análise dos resultados, compara-se os valores de ' F ' e ' $F_{crítico}$ ', ' α ' e ' P_{value} ' chegando as seguintes conclusões:

- Se o valor de ' F ' for menor que o valor crítico, ' $F_{crítico}$ ', não podemos rejeitar a hipótese H_0 ;
- Caso contrário, se ' F ' for maior que valor crítico (' $F_{crítico}$ '), rejeitamos H_0 ;
- Se ' P_{value} ' for maior que ' α ', não podemos rejeitar H_0 ;
- Contudo se ' P_{value} ' for menor que ' α ', rejeitamos H_0 .

Da ANOVA, temos:

Tabela 10 - Resumo Características Solo Cimento Para Uso da Anova

<i>Dosagem</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
7%	3	5,99	1,9967	0,00503
10%	3	8,48	2,8267	0,07403
13%	3	11,26	3,7533	0,00563

Fonte: Autor

Tabela 11 - ANOVA para Dosagens de Solo Cimento

<i>Fonte da variação</i>	SQ	GI	MQ	F	P-value	F crítico
Entre grupos	4,633489	2	2,3167	82,057	4,39E- 05	5,143
Dentro dos grupos	0,1694	6	0,0282			
Total	4,802889	8				

Fonte: Autor

Segundo o teste da Anova, então, verifica-se a veracidade das hipóteses, considerando $\alpha = 0,05$. Observando assim, temos que: $F = 82,06 \geq F_{crítico} = 5,14$, assim como $P_{value} = 4,39E - 5 \leq \alpha = 0,05$

Portanto, a hipótese H_0 deve ser rejeitada, concluindo dessa maneira que pelo menos uma das médias dos CP's é diferente, o que é condizente com o esperado para a situação abordada.

Para os dados referentes as misturas de solo cal, temos o exposto na Tabela 10:

Tabela 12 - Resumo Características Solo Cimento Para Uso da Anova

<i>Dosagem</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
3%	3	4,12	1,3733	0,05763
5%	3	6,77	2,2567	0,00093
7%	3	5,46	1,8200	0,01290

Fonte: Autor

Tabela 13 - ANOVA para Dosagens de Solo Cal

<i>Fonte da variação</i>	SQ	gl	MQ	F	P-value	F crítico
Entre grupos	1,170467	2	0,5852	24,567	0,001289	5,143
Dentro dos grupos	0,142933	6	0,0238			
Total	1,3134	8				

Fonte: Autor

Para esta análise de variância, as mesmas hipóteses relacionadas ao solo cimento são válidas, portanto foi comparado os valores de 'F' e ' $F_{crítico}$ ', ' α ' e

' P_{value} ', obtendo assim: $F = 24,57 \geq F_{crítico} = 5,14$, assim como

$$P_{value} = 1,29E - 3 \leq \alpha = 0,05.$$

De maneira análoga as amostras de solo cimento, foi possível concluir que a hipótese H_0 deverá ser rejeitada, assumindo a hipótese H_1 , afirmando então que as médias dos CP's são estatisticamente diferentes. Mais uma vez, foi obtido de maneira estatística que os resultados estão conforme o esperado.

6.4 Análise Econômica

Visto a partir dos gráficos e tabelas que 3, das 6 dosagens utilizadas atingiram resultados mínimos condizentes com a NBR 12253, cabe agora dizer qual delas apresenta um custo x benefício mais interessante para o investidor.

Considerando então, o kg do cimento comprado em Campo Mourão no dia 04 de Setembro de 2015, em uma loja de material de construção saiu por R\$ 0,56 e o kg da cal virgem R\$ 0,48. Assim, considerando que uma camada de base de um pavimento rodoviário de uma via para o trecho de um quilometro possua estas dimensões:

- Altura: 0,15 m;
- Largura: 14 m;
- Comprimento: 1000m;

Para a realização do cálculo de toneladas para tais dimensões, faz-se necessário também o conhecimento da densidade seca máxima do material, que para este caso é igual a: 1,589 g/cm³, portanto, têm-se:

$$V = h \times l \times c$$

$$V = 0,15 \times 14 \times 1000$$

$$V = 2100m^3$$

Assim, temos:

$$M = 2100 \times 1,589$$

$$M = 3336,9 \text{ ton}$$

6.4.1 Custo de Sub-Base e Base Utilizando Solo Cimento e Solo Cal

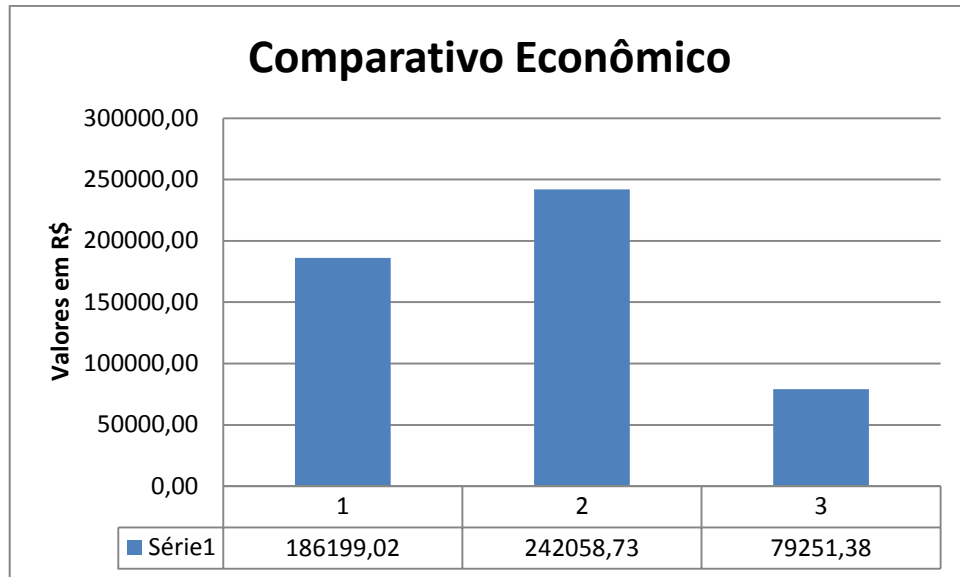
Portanto, para essa quantidade de material, a tabela apresenta o custo das misturas estudadas.

Tabela 14 - Comparativo Econômico das Dosagens

Material	Cimento		Cal
Dosagem	10%	13%	5%
Peso Aditivo (ton)	333,69	433,80	166,85
Preço (kg)	R\$ 0,56	R\$ 0,56	R\$ 0,48
Preço (ton)	R\$ 558,00	R\$ 558,00	R\$ 475,00
Preço/km	R\$ 186199,02	R\$ 242058,73	R\$ 79251,38

Fonte: Autor

Desta forma, é possível afirmar que a mistura solo cal comportou-se melhor, dando um retorno mais positivo para o investidor, significa então, que esta apresenta melhor custo x benefício. É interessante salientar aqui também, que as dosagens de cimento, apesar de apresentarem valores financeiros até 3 vezes superiores a mistura com cal, ainda assim atendem aos valores mínimos de tensão exigidos pela 143/2010 ES - DNIT, podendo assim ser utilizadas para tal finalidade.



- 1 – Dosagem Solo Cimento 10%; 2 – Dosagem Solo Cimento 13%;
 3 – Dosagem Solo Cal 5%;

6.4.2 Custo de Sub-Base e Base Utilizando Brita Graduada Simples

Para realizar um comparativo entre o material para base proposto, solo cimento e solo cal, e a brita graduada simples, um dos materiais mais utilizados para este fim, foi consultada a tabela de preços do DAER/RS (Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem do Rio Grande do Sul) do mês de Abril/2015, com BDI = 39,17% (com desoneração). A partir desta, obteve-se o valor de R\$ 78,84/m³. Então, considerando o mesmo trecho para ambos os materiais, temos:

Tabela 15 - Custo Brita Graduada Simples Para Um Quilometro

Material	Brita Graduada Simples (BGS)
Volume (m ³)	2100
Preço/m ³	R\$ 78,84
Preço/km	R\$ 165.564,00

Fonte: Autor

7 CONCLUSÕES

Por fim, este trabalho de conclusão de curso trouxe alguns resultados expressivos para a área de pavimentação, confirmando que o uso de aditivos em solos argilosos promove um acréscimo significativo em sua resistência. Além de que a escolha correta do material e de sua dosagem a ser acrescida influencia de maneira direta na mistura. De acordo com o que foi obtido e estudado, pode-se afirmar:

- Para a microrregião em questão, encontrou-se como mostrado no capítulo 6, que o solo estudado foi um A 7-5, uma argila siltosa, e para que esta obtivesse um desempenho mais favorável o aditivo mais indicado seria a cal virgem na dosagem de 5% do total de massa do solo, isso porque esta mistura atende as normativas mínimas exigidas e ainda apresenta uma melhor relação custo x benefício para o investidor.
- Acredita-se ainda que a cal virgem apresenta um teor ótimo para adição, por isso então, observou-se melhoras maiores para o teor de 5% em relação ao de 7%, ainda neste contexto, entende-se que isto ocorra devido as reações de hidratação da cal virgem e posteriormente as reações pozolânicas,
- Como esperado, para solos argilosos, o uso de cimento como aditivo torna-se inviável, sendo este material comumente indicado para solos mais arenosos, onde usaria-se menor quantidade de aditivo, tornando assim a mistura mais vantajosa na relação custo x benefício.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para próximos trabalhos fica em aberto o uso de cal hidratada, para que haja uma comparação entre as dosagens das cales, uma vez que as reações de hidratação podem influenciar nos resultados de ensaios como Resistência à Compressão Simples e Índice de Suporte Califórnia. Outra lacuna deixada neste, foi a quantidade de corpos de prova, que poderia ser maior, para que pudessem dar uma análise estatística mais refinada dos resultados.

Uma nova pesquisa a ser estudada pode ser feita utilizando-se solos arenosos, para determinar o comportamento dos aditivos, verificando assim as diferenças entre dosagens de diferentes tipos de solos.

Sugiro ainda um trabalho, para uma área além da Engenharia Civil, que analise as reações moleculares que ocorrem entre solo e aditivo, para que se possa determinar assim as dosagens e tipos de solo mais indicados para cada material.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR 12253 – Solo-cimento: Dosagem para o emprego como camada de pavimento. Procedimento**. Rio de Janeiro, ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR 12024 – Solo-cimento: Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR 12024 – Solo-cimento: Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova Cilíndricos**. Rio de Janeiro, ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR 12025 – Solo-cimento: Ensaio de Compressão Simples de Corpos-de-Prova Cilíndricos**. Rio de Janeiro, ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457 – Amostras de Solo - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. 6. ed. 234 p.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 560 p. il.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO RS. Rio Grande do Sul: **Tabela de Preços Oficial**. Rio Grande do Sul, 2015

Disponível em: <http://www.daer.rs.gov.br/siteforca_download.phparquivo=arquivosobrado_carquivo15_111.pdf>

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO PARANÁ - ES-P 11/05. **Pavimentação: Solo-cimento e Solo Tratado com Cimento**. Paraná, 2005.

Disponível em: <http://www.pr.gov.br/derpr/pdf/PDF/pdf_Pavimentacao/ES-P11-05SoloCimento_SoloTratadoCimento.pdf>

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

Disponível em: <http://www.pr.gov.br/derpr/pdf/PDF/pdf_Pavimentacao/ES-P1105SoloCimento_SoloTratadoCimento.pdf>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DOS TRANSPORTES (DNIT). **Pavimentação – Base de Solo-Cimento – Especificação de Serviço**. DNIT 143/2013, Rio de Janeiro, 2010.

Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit143_2010_es.pdf>

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 2.ed São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 353 p.il.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2001.