

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FELIPE LERMEN

**ESTUDO PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM ADITIVO QUÍMICO PARA
USO EM BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS URBANOS E ESTRADAS
RURAIS**

SÃO LEOPOLDO
2020

FELIPE LERMEN

**ESTUDO PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM ADITIVO QUÍMICO PARA
USO EM BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS URBANOS E ESTRADAS
RURAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção de título de
Bacharel em Engenharia Civil, pelo curso de
Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio
dos Sinos – UNISINOS

Orientador: Me Eng. Fabiano da Silva Jorge

São Leopoldo

2020

Dedico este trabalho, primeiramente, ao meu pai Léo e minha mãe Salete, minhas irmãs Fabrícia e Letícia, minha esposa Eloisa que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida. Aos amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constantes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me acompanhar e me dar forças durante este período de graduação, onde houve mudanças de endereço e mudanças de emprego, mas que serviram somente para fortalecer minha força para vencer.

Agradeço aos meus pais, pelo apoio e incentivo, por me proporcionar recursos financeiros para que eu pudesse sempre estudar, e na minha graduação não foi diferente. Sei da realização deles em ver hoje eu concluindo mais esta etapa na minha vida, uma vez que eles não puderam e também não tiveram esta oportunidade.

Agradeço ao professor Fabiano da Silva Jorge pela orientação, atenção e dedicação com relação ao presente trabalho, desde a escolha do tema até a entrega. Aos técnicos de laboratório pelo auxílio na execução de alguns ensaios. Agradeço à empresa Argiplam Mineração Ltda pelo fornecimento do solo necessário para os ensaios experimentais. E, por fim, agradeço à empresa Con-Aid pelo fornecimento do aditivo utilizado. Sem estes o trabalho não teria sido feito.

Agradeço aos laboratoristas e amigos do laboratório de mecânica dos solos: André Weber Stein, Jeremias Gehm, Bianca Carlin Cadore e Igor Wiskowque, que me ajudaram com os ensaios.

Agradeço a empresa que trabalho, Argiplam Mineração Ltda, por serem compreensíveis e flexíveis com os horários necessários para a realização dos ensaios no laboratório e também pelo fornecimento de solo para execução do trabalho.

Ademais, agradeço todos meus amigos e demais pessoas da minha convivência pela compreensão das minhas ausências.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”.

(José de Alencar, 2020)

RESUMO

Em obras de infraestrutura de transporte que visam exclusivamente o modal rodoviário, possuem como principal matéria-prima, o solo. Ao utilizá-lo, é necessário que se faça uma avaliação de suas propriedades físicas e mecânicas, a fim de estabelecer parâmetros que forneçam uma base estrutural, necessária para o pavimento quando exigido frente a solicitações de tráfego e intempéries causadas pelo meio. Para situações onde o material disponível não teve suporte a estes esforços, surgiu como medida a estabilização química com a inserção de aditivos que puderam suprir estas necessidades e deram o devido suporte. Este tipo de solução tende em resultar numa boa relação de custo-benefício, e há muitos anos vem dando resultados. Embasado nisso, para a execução deste estudo foram avaliadas a capacidade de suporte e a resistência a compressão simples de um solo argiloso, onde foram adicionados dois teores distintos de CBR Plus, definidos através de estudos de uso anteriores em solos com propriedades similares, nas dosagens de 0,35% e 0,7%. Com os ensaios realizados e resultados obtidos foi possível validar o aumento de capacidade de suporte em função destas adições e, ainda, justificar que é uma solução prática e eficiente para execução de camadas de pavimento

Palavras-chaves: Solo melhorado com aditivo. Estabilização química. Base e sub-base. Capacidade de suporte.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pavimentação da Via Appia Antica, Roma.....	19
Figura 2 - Estrutura de um pavimento flexível em corte longitudinal	21
Figura 3 - Revestimento de CBUQ.....	23
Figura 4 – Execução de Sub-base.	24
Figura 5 - Regularização de Subleito.	25
Figura 6 - Perfil Resultante da Decomposição de Rochas	28
Figura 7 - Argila Acinzentada	32
Figura 8 - Argila Avermelhada, Barro.....	32
Figura 9 - Elementos Granulares do Solo a) areia,b) brita e c) seixo.....	33
Figura 10 - Processo de Produção de Emulsão Asfáltica.	41
Figura 11 - Aplicação da Solução de Sulfato de Alumínio.....	43
Figura 12 - Fluxograma da Metodologia.....	45
Figura 13 - Localização da Jazida.....	46
Figura 14 - Imagem aérea da Jazida.....	46
Figura 15 - Coleta das amostras de solo – Argila.....	47
Figura 16 - Processos de sedimentação e peneiramento.	48
Figura 17 - Aparelho de Casagrande.	49
Figura 18 - Determinação do limite de plasticidade.....	50
Figura 19 - Balão volumétrico para realização do ensaio do peso específico.	51
Figura 20 - Etapas do Ensaio de Próctor	53
Figura 21 - Processo de rompimento dos CBR's.	54
Figuras 22 - Processo de rompimento dos CBR's.....	55
Figura 23 - Caminhão pipa molhando o solo com solução com aditivo.....	57
Figura 24 - Patrol motoniveladora escarificando o solo.....	57
Figura 25 - Material solto após o processo de escarificação.....	58
Figura 26 - Máquina PT-400 executando a moagem das pedras.....	58
Figura 27 - Solo depois que passou pelo processo de moagem.....	59
Figura 28 - Caminhão pipa molhando o solo com solução de aditivo.	59
Figura 29 - Patrol motoniveladora regularizando o solo.	60
Figura 30 - Rolo compressor passando para compactar o solo.	60
Figura 31 - Patrol motoniveladora regularizando o pavimento.	61

Figura 32 - Estrada pronta para o uso..... 61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos Solos, segundo o TRB.....	31
Quadro 2 - Granulometria do material.....	35
Quadro 3 - Composição das cales brasileiras (valores médios).....	37
Quadro 4 - Emulsões recomendadas para cada tipo de serviço.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistema Unificado de Classificação dos Solos (S.U.C.S)	29
Tabela 2 - Tipos de Cimento Portland.....	39
Tabela 3 - Parâmetros de Consistência do solo.....	65
Tabela 4 - Determinação do Peso Específico Real dos Grãos.....	66
Tabela 5 - Resultado da umidade ótima e densidade seca aparente do solo.	67
Tabela 6 - Expansão dos corpos de prova imersos por 96 horas.	67
Tabela 7 - Determinação da resistência a compressão simples em 4 dias.....	68
Tabela 8 - Comparativo nos ISC com dois tipos de cura	71

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C	Antes de Cristo
CAP	Concreto Asfáltico de Petróleo
CBR	Califórnia Bearing Ratio
CCR	Concreto Compactado com Rolo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra estrutura de Transportes
HRB	Highway Research Board
ISC	Índice de Suporte Califórnia
NBR	Norma Técnica
RCS	Resistência à Compressão Simples
TRB	Transportation Research Board
U.S.C	Sistema Unificado de Classificação
MPa	Mega Pascal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 TEMA	15
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	15
1.3 PROBLEMA	15
1.4 OBJETIVOS	15
1.4.1 Objetivo Geral.....	15
1.4.2 Objetivos Específicos	16
1.5 JUSTIFICATIVA	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 PAVIMENTAÇÃO.....	18
2.1.1 Histórico da Pavimentação.....	18
2.1.2 Pavimentação no Brasil.....	19
2.1.3 Estruturas de Pavimentos	20
2.2 SOLO	26
2.2.1 Estrutura do Solo	27
2.2.2 Classificação do Solo	28
2.2.3 Sistema Unificado de Classificação de Solos	28
2.2.4 Sistema de Classificação HRB/TRB.....	30
2.3 SOLOS COESIVOS	31
2.4 SOLOS NÃO COESIVOS.....	33
2.5 ESTABILIZAÇÕES.....	33
2.5.1 Estabilização Granulométrica	34
2.5.2 Estabilização Química.....	36
3 METODOLOGIA	45

3.1 COLETA DE AMOSTRAS	46
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	47
3.2.1 Granulometria	48
3.2.2 Limites de Atterberg	48
3.3 ENSAIO DE PRÓCTOR	52
3.4 ENSAIOS MECÂNICOS	53
3.4.1 Índice de Suporte Califórnia (ISC).....	53
3.4.2 Resistência a Compressão Simples (RCS)	54
3.5 OBRA REALIZADA COM O ADITIVO	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 CARACTERIZAÇÕES DO SOLO.....	63
4.1.1 Análise Granulométrica	63
4.1.2 Limites de Atterberg.....	64
4.1.3 Classificação do Solo	65
4.1.4 Peso Específico Real dos Grãos.....	66
4.1.5 Ensaio de Compactação	66
4.2 ANÁLISES DE RESISTÊNCIAS.....	67
4.2.1 Resistência a Compressão Simples	68
4.2.2 Índice de Suporte Califórnia.....	69
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
5.1 Conclusões.....	72
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	73
REFERÊNCIAS.....	74
APÊNDICES	78

1 INTRODUÇÃO

Composto por sais minerais, o solo representa a camada mais superficial da crosta terrestre e apresenta muitas variações, devido a sua formação e deposição. Responsáveis por este fenômeno é a origem, o relevo, o clima, o tempo e os organismos. Estas combinações são determinantes para a formação do solo, dependendo da intensidade das mesmas, se obteve as características do solo.

Visando o conhecimento dos solos a partir de estudos, o profissional da área de engenharia civil tem por finalidade, a utilização dos mesmos para dar sustentação às suas edificações onde se citou como exemplo mais prático, as fundações. Em pavimentações rodoviárias, tem papel fundamental ao dar sustentação ao pavimento tanto no ponto de vista econômico como de segurança.

Os pavimentos são constituídos por uma estrutura de várias camadas, construídas a partir de terraplanagens e possuem função de resistir a esforços transmitidos pelo tráfego que nele transitam e a melhorar as condições das pistas de rolamento.

Para o dimensionamento do pavimento é necessário dispor de determinados grupos de materiais para compor as camadas, que atenda as necessidades de cada projeto, para que se alcance um bom desempenho. No entanto, levam-se em consideração que as diversas camadas do pavimento, devem trabalhar em conjunto, sabendo que os materiais são diferentes e complexos, quantos ao seu comportamento e as suas interações.

Com a crise em que o país enfrenta nos últimos anos e a escassez de recursos financeiros, se torna oportuno estudar materiais alternativos que possam ser utilizados na construção rodoviária, sob o ponto de vista técnico-econômico.

Diante da busca cada vez maior por soluções de baixo custo, e que visem preservar os recursos naturais, a estabilização de solos surge como uma ótima alternativa ao emprego de britas, tradicionalmente usadas em camadas de pavimento. O processo de estabilização de solos conduz às estruturas de pavimentos com bom desempenho e durabilidade.

Com isso, existem diferentes processos de estabilização de solos. A estabilização mecânica, em que se compacta em determinadas condições um solo ou mistura de solos, procurando aumentar a coesão e o ângulo de atrito interno. Já a estabilização química modifica as características dos solos por adição de

aglutinantes, onde são empregados para desempenhar a função de ligante. Finalmente, a estabilização física, procura evitar a quebra de resistência ou da durabilidade, por efeito de reações físicas que modificam as propriedades dos solos.

1.1 TEMA

O trabalho é um estudo de geotecnia com aplicação de aditivo químico, em teores para estabilização e melhoramento. Diante da busca cada vez maior por soluções de baixo custo, e que visam à preservação dos recursos naturais, a estabilização de solos surge como uma boa alternativa ao emprego de britas, com a finalidade de avaliar suas propriedades para aplicação em obras rodoviárias de pavimentação.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho se limita a fazer ensaios físicos para caracterizar o solo e mecânicos de Resistência à Compressão Simples (RCS) e Índice de Suporte Califórnia (ISC) em solo granular e elaborar dosagens com teores de 0,35% e 0,70% de aditivo químico CBR Plus da marca Con-Aid, com a finalidade de obter maior resistência do solo e avaliar suas propriedades para aplicação em obras de pavimentação através de métodos descritos na metodologia.

1.3 PROBLEMA

Transformar o solo em material apropriado para execução de projetos de pavimentação melhorando suas propriedades e comportamentos para atender os requisitos técnicos por meio de dosagens de teores de aditivo químico.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Estudar a estabilização de solos com uso de aditivo químico para uso em bases e sub-bases de pavimentos urbanos e estradas rurais.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os seguintes objetivos específicos que contribuíram para alcançar o objetivo geral deste trabalho são:

- a) Caracterizar a amostra de solo;
- b) Elaborar as estabilizações com os teores de 0,35% e 0,70% de aditivo químico;
- c) Realizar os ensaios mecânicos (RCS e ISC) nos solos *in natura* e estabilizados;
- d) Analisar os resultados obtidos e validar ou não, a utilização dos solos para bases e sub-bases.

1.5 JUSTIFICATIVA

A área de mineração é, sem dúvida, a base econômica no Brasil. Ela é uma atividade de extrema importância para o desenvolvimento econômico e social do país. Contudo, esta atividade gera grandes impactos ambientais de forma negativa e por isso, com as constantes explorações de jazidas pétreas, além da escassez eminente, contribuem para a degradação do meio ambiente. A estabilização de solos surge com uma alternativa, ambientalmente correta e tecnicamente exeqüível.

Sabendo da grande exploração e da escassez de recursos naturais, buscou-se, estudar através deste trabalho, o uso alternativo de solos modificados quimicamente como se vem fazendo no Brasil desde a década de 40, motivado pelo crescimento acelerado do estado de São Paulo onde foram iniciados os processos de pavimentação. Já nesta época, como os solos não apresentavam características que dessem suporte e estrutura aos pavimentos, muitos empreiteiros se obrigavam a buscar alternativas em materiais que apresentassem melhor qualidade em outros locais. Com isso, surgiu a idéia de buscar uma estabilização de solos a partir da adição de componentes de fácil acesso, como exemplo o cimento e a cal. Ao contrário de ter que fazer uma grande movimentação de material, o qual gera grandes custos operacionais, poderá ser utilizado o solo local, trazendo economia

em transporte e compra de agregados para a obra, proporcionando camadas de base que atendam as especificações normativas.

O estudo proposto neste trabalho visa então, elaborar através de dosagens, melhorarem o comportamento do solo disponível com adição de aditivos químicos, diminuindo os custos, o tempo e a logística de pavimentações e ainda melhorar a resistência do mesmo. Diante disso torna-se oportuna a elaboração desse trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a revisão literária sobre estabilização e melhoramento de suporte de carga de solos, tratando de definir o desenvolvimento de uma mistura entre solo e aditivo químico e suas devidas dosagens que servirão de base para o presente estudo.

2.1 PAVIMENTAÇÃO

2.1.1 Histórico da Pavimentação

Nos dias atuais, imaginar o mundo sem a presença das estradas é impossível, onde estas são responsáveis, indiretamente, por uma significativa parcela da arrecadação econômica de todos os países. Pois a partir do modal rodoviário transações de bens e serviços são facilitadas, a locomoção entre cidades é possível e há a geração de empregos diretos e indiretos. No Brasil, mais de 60% do transporte de cargas é realizado pelo modal rodoviário e este é responsável por 96% da movimentação dos passageiros (GEIPOT, 2001). Por isso, os países dependem de um belo estudo de infra-estrutura de transporte rodoviário, para que se desenvolva.

No Brasil, segundo o DNER, foi com a inauguração da estrada União Indústria, em 1861 que ligava os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, ponto de partida para a história do rodoviarismo nacional. Porém, a primeira lei de auxílio para construção de rodovias foi concedida apenas em 1905. Em 1933, foi criado pelo governo federal o DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), com o propósito de inspecionar a criação de estudos e projetos de rodovias.

A primeira estrada pavimentada no mundo foi construída no Egito, cerca de 2500 anos a.C, para a construção das pirâmides.

Os Romanos se aperfeiçoaram na construção de rodovias entre os anos de 300 a.C e 200 a.C, para finalidades militares e comerciais pela Europa.

Os romanos foram os primeiros a aperfeiçoar as estradas criando o que hoje se chama pavimentação, com objetivo de criar uma estrutura duradoura. Já naquela época, a pavimentação era considerada essencial para uma sociedade desenvolvida, conforme ilustra a Figura 1:

Figura 1 - Pavimentação da Via Appia Antica, Roma



Fonte: Cava (2019)

Em 1775 na França, o engenheiro Pierre Trésaguet, entendeu que as rodovias necessitariam de manutenção. John Metcalf, por sua vez, foi o primeiro engenheiro a projetar rodovias incorporando a necessidade de haver um projeto de drenagem.

Segundo Pereira et al. (2013), o transporte é responsável pelo desenvolvimento econômico de qualquer cidade, região ou país por proporcionar mobilidade, acessibilidade, além de permitir fluxo de materiais e mercadorias. De modo que os países que possuem boa infra-estrutura de transportes são desenvolvidos porque fizeram e fazem manutenção das suas estradas e vias de transporte de todo e qualquer tipo, e não o contrário, ou seja, eles não a têm por serem desenvolvidos (VIANA, 2007 apud PEREIRA et al., 2013).

2.1.2 Pavimentação no Brasil

Segundo Skaf (2017), a precariedade da infra-estrutura de transporte no Brasil e a grande crise econômica nos últimos anos, foram os grandes responsáveis pelo declínio do crescimento econômico do país. Diversos motivos contribuíram para

que um dos modais mais importantes senão o maior fosse responsável pela perda de competitividade interna e externa, falando de economia. Podem-se citar alguns como falta de manutenção, ampliação, modernização e planejamento.

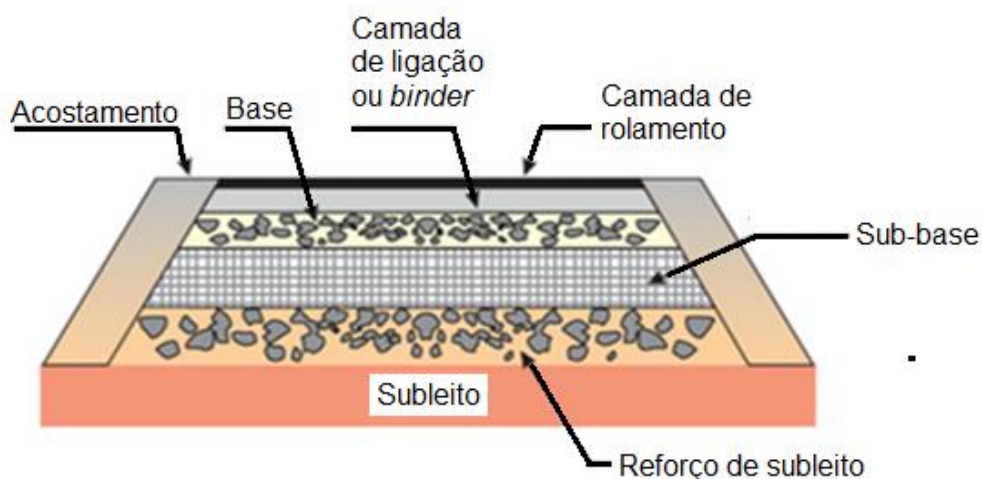
Para Cavaliere (2017), a importância de se ter um pavimento de atenda as questões de segurança e conforto dos usuários, estará intimamente ligada e poderá afetar a eficiência do transporte das riquezas do país, sendo que 80% dos bens produzidos são transportados pelo modal rodoviário.

2.1.3 Estruturas de Pavimentos

Para Senço (2008), uma seção transversal típica de um pavimento dispõe de um subleito, um reforço de subleito, quando necessário, uma sub-base, uma base e por fim o revestimento ou capa de rolamento, sendo a espessura e o material de cada camada determinados por uma das várias maneiras de dimensionamento.

As estradas pavimentadas são constituídas de um pavimento de múltiplas camadas. São construídas sobre uma superfície em que fora realizada a terraplanagem e que se destina a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima e também deve garantir ao usuário conforto adequado, economia e segurança (BERNUCCI et al. 2006). A Figura 2 mostra a estrutura de um pavimento flexível em corte longitudinal.

Figura 2 - Estrutura de um pavimento flexível em corte longitudinal



Fonte: Bernucci et al. 2006

Estradas não pavimentadas ou estradas de terra ou rurais, normalmente são construídas usando-se o solo natural local na camada final (de rolamento). Já as estradas com revestimento primário são rodovias revestidas com uma camada de material que tenha uma capacidade de suporte maior do que o solo local natural (OLIVEIRA, 2005).

Em estradas não pavimentadas que não receberam a capa asfáltica que possui a função de selar a estrutura, transferem os esforços provenientes do tráfego para sua base e/ou sub-base. Portanto, este tipo de estrutura está sujeita a riscos de erosão por não estarem impermeabilizadas, e isso justifica fazer um tratamento com estabilizantes ou alternativas que possam minimizar tais riscos e garantir maior durabilidade.

Sabendo que o homem depende diretamente das estradas para escoar sua produção dos mais variados setores e considerando que implicará diretamente na economia da sociedade provocando prejuízos, a degradação oriunda de processos erosivos é um dos principais problemas que afetam a trafegabilidade das estradas não pavimentadas. (Griebeler et al. 2005).

2.1.3.1 Revestimento

O revestimento de um pavimento, também conhecido como capa de rolamento, é a camada permeável ou impermeável, que recebe diretamente as

ações, estáticas ou dinâmicas, do tráfego e deve resistir aos esforços horizontais que nele atuam sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes, ou ainda, perda de compactação (BALBO, 2011).

Esta camada de revestimento torna a superfície de rolamento do pavimento mais durável, além de melhorar as condições de conforto e segurança (MEDINA e MOTTA, 2005).

Para cumprir tais funções o revestimento é composto por materiais bem aglutinados ou dispostos de maneira a evitar sua movimentação horizontal. Como por exemplo: pedras cortadas justapostas, como nos pavimentos romanos; Paralelepípedos; Blocos pré-moldados de concreto; Placas de concreto; Concreto compactado com rolo (CCR); Tratamentos superficiais betuminosos; Misturas asfálticas em geral (BALBO, 2011).

A camada de revestimento, por ser o material mais nobre, possui a menor espessura, e esta é adotada em função do tráfego previsto ou em função de critérios próprios. Valores habituais, segundo Senço (2008), para vias simples (duas faixas de tráfego) giram em torno de 3 a 5 cm. Já em auto-estradas esta espessura está entre 7,5 e 10,0 cm. Pelo fato do revestimento ser, normalmente, a parcela mais onerosa do pavimento, os melhores métodos de dimensionamento são os que primeiramente fixam a espessura desta camada e calculam as demais camadas em função das tensões restantes. Desta forma, o pavimento se torna mais barato. Não obstante, se a espessura desta camada for pequena, à medida que o tráfego for exigindo, poder-se-á executar nova capa de rolamento sobre a original, aproveitando toda a estrutura existente (SENÇO, 2008). A Figura 3 representa a imagem de revestimento asfáltico.

Figura 3 - Revestimento de CBUQ



Fonte: Studart (2020)

2.1.3.2 Base

A base desempenha papel fundamental na drenagem sub superficial e na absorção dos esforços verticais oriundos do tráfego (MEDINA e MOTTA, 2005). Esta camada pode ser constituída por solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada simples, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico, aéreo ou asfáltico. Até mesmo em pavimentos rígidos é necessária a presença da base, justamente pelo papel hidráulico que a mesma desempenha (BALBO, 2011).

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

- Rígida:
- Concreto de Cimento
 - Concreto Compactado com Rolo
 - Macadame Cimentado
- Semi-Rígidos:
- Solo - Cimento
 - Solo - Cal
 - Base Granular Tratada com Cimento

2.1.3.3 Sub-base

A sub-base é a camada complementar à base, executada quando não é possível, por motivos técnicos e econômicos, construir a base diretamente sobre o subleito ou sobre o reforço do subleito, quando existente. Normalmente, com exceção dos pavimentos de estrutura invertida, o material da sub-base deve apresentar propriedades superiores às do material de reforço e inferiores às do material de base (SENÇO, 2008). A Figura 4 ilustra a execução da sub-base de um pavimento.

Figura 4 – Execução de Sub-base.



Fonte: Souza (2013)

2.1.3.4 Reforço de Subleito

Conforme Balbo (2011), caso o subleito apresente baixa resistência aos esforços verticais, os quais ocasionam cisalhamento, é necessário executar uma camada sobre o subleito composta por solo de melhor qualidade, com o objetivo de absorver boa parte das tensões e transferir para o subleito pressões de menor magnitude, compatíveis com sua resistência.

Como alternativa para solucionar o problema de subleito com baixa resistência é aumentar a espessura das outras camadas que compõem o pavimento. Porém, as camadas superiores são executadas com material mais nobre, logo, elevaria o custo da estrutura, tornando-a inviável economicamente. Em

contrapartida, o material utilizado no reforço de subleito é outro solo, com propriedades mecânicas superiores, reduzindo o custo total do pavimento (BALBO, 2011).

2.1.3.5 Subleito

O subleito pode ser definido basicamente como o terreno de fundação do pavimento. Entretanto, este é considerado como um semi-espaço infinito, ou seja, apenas a camada próxima da superfície é resistente aos esforços impostos. Isto ocorre pelo fato das pressões exercidas se reduzirem gradativamente à medida que aumenta a profundidade no maciço, atingindo uma determinada profundidade em que as mesmas são desprezíveis (SENÇO, 2008). A Figura 5 demonstra a regularização de um subleito.

Figura 5 - Regularização de Subleito.



Fonte: Assis (2013)

Para Levy (2009), o subleito é o terreno de fundação preparado para receber o pavimento industrial. No Brasil, que segue a escola européia de trabalhar com pisos delgados, o subleito, que na maioria das vezes exerce o papel de fundação direta, é uma camada bastante exigida pela transmissão de esforços do pavimento industrial ao solo.

A resistência do subleito, para efeitos de dimensionamento, é usualmente obtida pelo método de Índice de Suporte Califórnia (ISC), do inglês Califórnia Bearing Ratio (CBR), ou pelo método de Francis Hveem. No método ISC, a

resistência é dada em porcentagem, a qual é tomada em um ensaio que mede a dificuldade de penetrar um pistão em uma amostra do solo do subleito. Essa resistência a penetração é então relacionada com a resistência oferecida por um material padrão, o qual possui ISC igual a 100%. Já no método de Francis Hveem, a resistência é determinada em um ensaio tri axial realizado no Estabilômetro de Hveem (SENÇO, 2008).

2.2 SOLO

Segundo a ABNT (NBR 6502), define solo como “Material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica”, ou simplesmente, produto da decomposição e desintegração da rocha pela ação de agentes atmosféricos.

Portanto, os solos reagem sob as fundações e atuam sobre os arrimos e coberturas, deformam-se e resistem a esforços nos aterros e taludes, influenciando as obras segundo suas propriedades e comportamentos. O estudo teórico e a verificação prática dessas propriedades e atuação é que constituem a Mecânica dos Solos.

Lepsch (1972, p.336) resume solo como sendo um corpo natural, formado horizontalmente por camadas paralelas a superfície composta por minerais e materiais orgânicos. Ele divide o solo em cinco camadas principais e usa as seguintes letras maiúsculas para simbolizá-las: O, A, B, C, R ou D. A primeira camada denominada de O, refere-se a material orgânico, horizonte referente a camada vegetal natural resultante de materiais decompostos organismos mortos e de natureza mineral. A camada A corresponde ao solo Aluvial, que sujeito a ação climática sofre lixiviação de compostos solúveis, que por sua vez movimentam mecanicamente as partículas argilosas (aluviação) e se depositam no horizonte B. Esta movimentação pode se dar como ascendente (capilaridade) ou descendente (gravidade), dependendo se o clima encontra-se úmido ou semi-úmido. Na área de conservação da estrutura da rocha, encontra-se o horizonte C e por fim R ou D corresponde à rocha propriamente dita, e suas formas de decomposição.

Segundo o Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Juiz de Fora (NuGeo, UFJF), o solo aplicado à Engenharia Civil é resultado do material encontrado na crosta terrestre provenientes de sedimentações e são usados como

suporte, que por sua vez, podem ser arrimados, escavados ou perfurados. Este material reage estruturalmente a fundações, em arrimos e servem de cobertura, sofrem deformação e apresentam resistência quando submetidos a esforços.

Pode se afirmar ainda que todo e qualquer solo seja proveniente de rochas que sofreram algum tipo de intemperismo promovido por ações físicas (degradação) e químicas (decomposição), sofridas por vários motivos sendo eles, climáticos, pelo relevo, pela fauna e pela flora, pela formação da rocha e como ela está exposta. Na Engenharia Civil, interessa o estudo do solo, pois é nele que se apoiará toda e qualquer estrutura, sendo ela de fundação, de contenção, de cobertura, estrutura rodoviária etc.

2.2.1 Estrutura do Solo

Segundo Pinto (2006), todos os solos têm origem da decomposição das rochas que constituíam inicialmente a crosta terrestre. A decomposição de agentes físicos e químicos. Variações de temperatura provocam trincas, nas quais a água penetra atacando quimicamente os minerais. O congelamento da água, entre outros fatores, exerce elevadas tensões e com isso ocorrem fragmentações nos blocos de variados tamanhos.

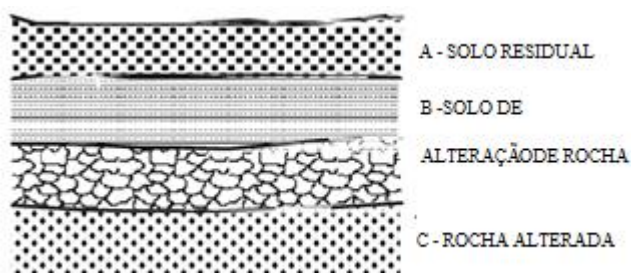
Portanto, o solo por ser um material que ocorre na natureza em diferentes formas, precisa-se classificá-lo de maneira que se consiga formular métodos para projetos baseados em propriedades e grupos. Desta forma, existem variados sistemas de classificação, cada um adequado a sua utilização e método. (DNIT, 2006)

Seguindo o sistema unificado, fundamentalmente, os solos são divididos em:

- a) Solos de granulometria grossa;
- b) Solos de granulometria fina;
- c) Solos altamente orgânicos.

Os solos de granulometria grossa são aqueles que ao passar na peneira norma de número 200, ficam 50% retidos, caso contrário, o solo será considerado de granulometria fina. Os solos altamente orgânicos são geralmente identificados com facilidade, pelo exame visual, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Perfil Resultante da Decomposição de Rochas



Fonte: DNIT (2006)

2.2.2 Classificação do Solo

Os solos de granulometria grossa são aqueles os quais 50% ficam retidos na peneira normal nº 200, caso contrário o solo será considerado de granulometria fina. Solos altamente orgânicos são geralmente identificados, com facilidade, pelo exame visual.

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 visuais e tácteis, pedologia e ainda um que leva em consideração, parâmetros geotécnicos do solo.

Contudo, segundo Caputo (1984), existem dois principais sistemas de classificação, sendo o: S.U.S.C (Sistema Unificado de Classificação de Solos), 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.

2.2.3 Sistema Unificado de Classificação de Solos

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

- a) 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).
- b) Solos finos - aqueles cujo diâmetro da maioria absoluta dos grãos é menor que 0,074 mm.
- c) 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, têm-se solos mais finos de baixa ou alta compressibilidade. E para o último grupo, têm-se solos de regiões pantanosas e com alta taxa de decomposição vegetal acumulada. Veja na Tabela 1 a seguir, o sistema de classificação dos solos.

Tabela 1 - Sistema Unificado de Classificação dos Solos (S.U.C.S)

Classificação Geral	Tipos Principais	Símbolos
SOLOS GROSSOS (Menos que 50% passando na # 200)	Pedregulhos ou Solos Pedregulhosos	GW, GP, GM e GC
	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 Pt
SOLOS ALTAMENTE ORGÂNICOS	Turfas	

Fonte: Adaptado CAPUTO (1988)

O SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) baseia-se na identificação dos solos conforme as suas qualidades de textura e plasticidade, agrupando-lhes de acordo com o seu comportamento quando utilizados em estradas, aeroportos, aterros e fundações. Assim os solos são classificados pelo SUCS.

2.2.4 Sistema de Classificação HRB/TRB

Conforme o DNIT (2006), 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. Para calcular, se usa a Equação 1.

$$IG = 0,2 * a + 0,005 * a * c + 0,01 * b * d \quad , \quad (\text{Eq.}) 1$$

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.

O Quadro 1 mostra a classificação dos solos, segundo o TRB. Determina-se solo, por processo de eliminação da esquerda para a direita, no quadro de classificação. O primeiro grupo a partir da esquerda, com o qual os valores do solo ensaiado coincidir, será a classificação correta.

Quadro 1 - Classificação dos Solos, segundo o TRB.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia		Pedregulho ou areias siltsosos ou argilosos				Solos siltsosos		Solos argilosos		
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: DNIT (2006)

2.3 SOLOS COESIVOS

Este tipo de solo apresenta grãos muito 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 floclada, assim, depósitos de argila formados no mar são altamente floclados. As argilas com este tipo de estrutura apresentam um alto índice de vazios e pouco peso.

Cita ainda dois tipos de coesão:

- a) Moderadamente coeso: material que resiste a penetração de faca, martelo pedológico e a trado. É um solo duro quando está seco e firme quando está úmido. A Figura 7 representa o solo moderadamente coeso.

Figura 7 - Argila Acinzentada



Fonte: Elementos de Fundações em Concreto (2015)

- b) Fortemente coeso: material muito resistente a penetração de faca, martelo pedológico e quando sujeito a trado. É extremamente duro quando seco e muito firme quando úmido. A Figura 8 representa um solo fortemente coeso.

Figura 8 - Argila Avermelhada.



Fonte: Elementos de Fundações em Concreto (201

2.4 SOLOS NÃO COESIVOS

Conforme (ALMEIDA, 2005), solos não coesos, são aqueles que estão classificados como areias, siltes, pedregulhos. São materiais que se esboroam facilmente ao seres, escavados ou cortados e tem por característica, o baixo índice de compactidade.

Subdivide-se 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), os 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. A Figura 9 ilustra os elementos granulares que compõem os solos não coesivos.

Figura 9 - Elementos Granulares do Solo a) areia, b) brita e c) seixo.



Fonte: Elementos de Fundações em Concreto (2015)

2.5 ESTABILIZAÇÕES

A pavimentação sugere exclusivamente o uso de solos nas diferentes camadas de sua composição. Para melhorar o condicionamento físico, diminuir custos e agilizar desenvolvimento da obra, o cenário ideal, é usar o solo já existente onde está sendo ou será realizado a obra. Portanto, geralmente os solos presentes

no local não atendem as especificações mínimas exigidas para a utilização. Com isso, necessitou a criação de métodos para tornar o solo mais adequado à 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.

2.5.1 Estabilização Granulométrica

A estabilização granulométrica consiste em se obter um material de estabilidade maior que os solos de origem e de porcentagem limitada de partículas finas, com a mistura íntima homogeneizada de dois ou mais solos e sua posterior compactação (VIZCARRA, 2010). Ou seja, consiste na alteração das propriedades do solo através da adição ou retirada de partículas do mesmo, procurando-se obter como produto final um material adequado para a aplicação em cada caso particular.

Os solos em sua fase sólida apresentam partículas de diferentes tamanhos e das mais variadas proporções. Sua distribuição, chamada distribuição granulométrica, depende da determinação do tamanho das partículas e suas respectivas porcentagens de ocorrências, permitindo uma melhor função.

Vogt (1971) exemplifica tal conceito com uma mistura de areia e argila em proporção definida e compactada na umidade ótima. Porém, existem materiais naturais que podem ser utilizados sem mistura ou adição. Mesmo assim, as especificações do DNER/ DNIT de materiais para base ou sub-base recebem o nome de “base estabilizada granulometricamente” (MEDINA e MOTTA, 2005).

Há dois fatores que influenciam no comportamento da composição granulométrica, são eles

- a) a natureza da partícula, pois a mesma deve apresentar resistência suficiente e não sofrer alterações indesejáveis e;
- b) a estabilização da composição deve ser considerada a densidade ótima, que pode ser entendida como o melhor arranjo das partículas aprimorando a distribuição dos esforços.

Portanto, segundo o DNIT (2006) para solos a serem utilizados como base granular para pavimentação, a composição dos mesmos deve atender faixas granulométricas em proporções específicas. Assim, porcentagens de agregado grosso, médio e fino são então combinadas obedecendo a uma das seis faixas de distribuição granulométrica, conforme o Quadro 2.

Quadro 2 - Granulometria do material.

Tipos	Para N > 5 X 10 ⁶				Para N < 5 X 10 ⁶		Tolerância de faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	08-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	02-08	05-15	05-15	10-25	06-20	06-25	± 2

Fonte: DNIT (2010)

Existem três métodos de correção granulométrica (MACHADO, 2013):

- Método de Rothfuchs: plota-se uma curva média de especificação de serviço ou da faixa de material desejado como diagonal de uma figura retangular e representa-se a porcentagem que passa no eixo das ordenadas em escala aritmética de 0 a 100%. Define-se uma escala de peneiras no eixo das abscissas a partir da curva plotada e traçam-se, no mesmo gráfico, as curvas granulométricas dos materiais disponíveis. A partir de considerações geométricas, definem-se os quantitativos de cada um dos materiais de empréstimo de modo a se produzir um novo material que atenda as especificações de serviço;
- Método Analítico: a determinação das frações constituintes do solo obtido pela composição de outros disponíveis processa-se pela solução de um sistema de equações onde as variáveis são as frações procuradas e as constantes são as quantidades dos vários solos disponíveis e,
- Método do Triângulo: se conhecendo as porcentagens de área e pedregulho, silte e argila, é possível representar os diferentes solos disponíveis e aquele

referente ao material desejado, pontualmente, em um gráfico triangular. A partir desse gráfico, determinam-se os percentuais de cada solo de modo a reproduzir outro material que atenda às exigências do material desejado.

2.5.2 Estabilização Química

A estabilização química ocorre quando o processo pelo qual, um material químico, seja ele estabilizante ou não, é adicionado ao solo gerando melhorias em suas propriedades físicas, no ponto de vista da engenharia civil.

Para atuar como estabilizante químico de um solo, modificando as suas propriedades físicas e químicas, o material a ser adicionado reage como agente impermeabilizante, dispersante, floculante ou agregante dos materiais presentes no solo (SILVA, 1968).

Lambe e Michaels (1954) apud Emmert (2010) citam três mecanismos essenciais para um estabilizante químico modificar as propriedades físicas do solo:

- a) A retirada da água adsorvida e eliminação da carga superficial dos solos, tornando, assim, as partículas hidrofóbicas. Estes compostos são chamados de agentes impermeabilizantes (ex: betume);
- b) O aumento da característica eletronegativa da superfície da partícula ou da espessura da membrana de água, aumentando a repulsão interparticular. Esses compostos são chamados dispersantes (ex: soda cáustica) e,
- c) A eliminação das forças de repulsão eletrostática ou atuação das moléculas-pontes entre partículas, facilitando a coesão interparticular. Esses compostos são chamados agentes agregantes ou floculantes (ex: cal).

2.5.2.1 Cal

A cal é um aglomerante que resulta do processo de calcinação de rochas carbonatadas onde predomina o carbonato de cálcio ou ainda do carbonato de

cálcio mais magnésio. Segundo Guimarães (2002), o resultado da calcinação dos carbonatos de cálcio e de cálcio-magnésio é, respectivamente, o óxido de cálcio (CaO) e cálcio-magnésio (CaO – MgO), denominados genericamente de cal virgem ou cal viva.

Nas Equações 2a e 2b, pode-se observar como se dão as reações de formação da cal virgem e da cal hidratada, pois a cal hidratada é resultado da hidratação da cal viva e é encontrada comercialmente em forma de pó.

Veja abaixo as respectivas equações:



Em função da reação de hidratação acima mostrada nas equações, se obtém o produto da cal cálcica. Através da calcinação do calcário dolomítico, se obtém a cal dolomítica, que é a reação do óxido de cálcio e óxido de magnésio (CaO + MgO). Desta forma, resultam os seguintes tipos de cal:

- a) Cal cálcica virgem - CaO
- b) Cal dolomítica virgem – CaO-MgO
- c) Cal cálcica hidratada – Ca(OH)₂
- d) Cal dolomítica mono-hidratada – Ca(OH)₂ - MgO
- e) Cal dolomítica bi-hidratada – Ca (OH)₂ - MG (OH)₂

Ainda segundo Guimarães (2002), encontra-se no mercado brasileiro as cales e suas respectivas propriedades com valores médios conforme o Quadro 3.

Quadro 3 - Composição das cales brasileiras (valores médios).

TIPOS DE CAL	CaO (%)	MgO (%)	Insolúvel no HCl (%)	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ (%)	Perda ao Fogo (%)	CO ₂ (%)	SO ₃ (%)	CaO + MgO Base de Não-Volátil(%)	MgO Não Hidratado (%)
CAL VIRGEM CALCÍTICA	90-98	0,1-0,8	0,5-3,5	0,2-1,0	0,5-5,0	0,2-3,8	0,1-0,6	96,0-98,5	-
CAL HIDRATADA CALCÍTICA	70-74	0,1-1,4	0,5-2,5	0,2-0,8	23-27	1,5-3,5	0,1-0,0		0,5-1,8
CAL HIDRATADA DOLOMÍTICA OU MAGNESIANA	39-61	15-30	0,5-18,2	0,2-1,5	19-27	3,0-6,0	0,02-0,2	76-99	5-25
CAL VIRGEM DOLOMÍTICA OU MAGNESIANA	51-61	30-37	0,5-4,5	0,2-1,0	0,54,8	0,5-4,5	0,05-0,1		-

Fonte: Guimarães (2002)

2.5.2.2 Cimento

O cimento Portland é um dos mais importantes materiais de construção e altamente empregado pela humanidade (MARTINS et al., 2007). O cimento é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes e ligantes, endurecendo quando entram em contato com a água. Depois de endurecido, mesmo sob ação de água o Cimento Portland não se decompõe mais (ABCP, 2002). Para Martins et al (2007), o cimento depende de diversos materiais para sua fabricação, dentre eles estão: calcário, argila, minério de ferro e gesso, os quais são analisados por diversas vezes durante o processo de fabricação, de forma a alcançar a composição química desejada.

A fabricação do cimento envolve as seguintes operações:

a) Dosagem, secagem e homogeneização das matérias primas: o calcário é a matéria prima básica, cerca de 85 a 95 %, constituído basicamente de carbonato de cálcio (CaCO₃), pode conter várias impurezas como magnésios, silício, alumínio e ferro. Com o intuito de corrigir a qualidade do clínquer, o calcário recebe adições de Filito (argila), Quartzito (material arenoso) e Minério de Ferro.

b) Clinquerização: a farinha é calcinada até a fusão a uma temperatura de 1450 ° C, onde se obtém o clínquer.

c) Mineralogia: no forno a sílica, alumina, ferro e cal reagem dando origem ao clínquer, onde são gerados os seguintes compostos: Silicato tricálcico (C3S), Silicato dicálcico (C2S), Aluminato tricálcico (C3A) e o Ferro aluminato tetracálcico (C4AF).

d) Adições finais e moagem: faz-se a moagem do clínquer com diversas adições, como gesso, pozolana, escória, entre outras, de acordo com as normas da ABNT. O processo de moagem pode interferir nas características do cimento, como hidratação e resistências iniciais. Os cimentos mais disponíveis no mercado são chamados de cimentos aditivados. Os compostos são misturas de cimento Portland comum com certos produtos, como materiais pozolânicos, escórias de alto forno e filler, onde são misturadas após o cozimento do aglomerante simples, modificando algumas propriedades interessantes (OLIVEIRA, 1994).

Os cimentos são classificados conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de Cimento Portland

Tipo de Cimento	Adições	Sigla	Norma
Cimento Portland Comum	Escória, pozolana ou filler (até 5%)	CP I-S 32 CP I-S 40	NBR 5732
Cimento Portland Composto	Escória (6 - 34%) Pozolana (6 - 14%) Filler (6 -10%)	CP II-E 32 CPII-E 40 CP II-Z 32 CPII-F 32 CP II-F 40	NBR 11578
Cimento Portland de Alto-Forno	Escória (35 - 70%)	CP III 32	NBR 5735
Cimento Portland Pozolânico	Pozolana (15 - 35%)	CP IV 32	NBR 5736
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	Materiais Carbonáticos (até 5%)	CP V - ARI	NBR 5733
Cimento Portland Resistente aos Sulfatos	Estes cimentos são designados pela sigla RS, Ex CP III 40 RS		NBR 5737

Fonte: Adaptado do Site da Associação Brasileira de Cimento Portland.

2.5.2.3 Emulsão Asfáltica

A emulsão asfáltica utilizada em estabilização de solos pode ser do tipo ruptura média (RM) ou ruptura lenta (RL). A escolha do tipo normalmente tem referência à quantidade de pó no agregado da mistura. Para agregados com maior

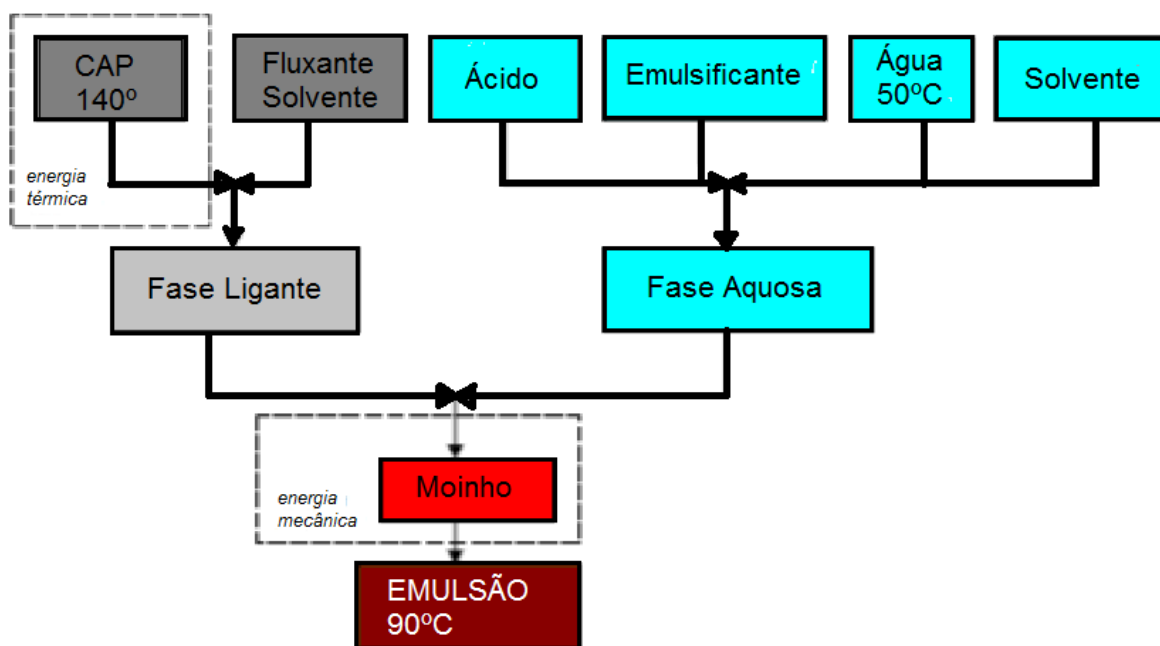
quantidade de pó, usualmente adota-se o RL, pois precisa de mais tempo para que a emulsão envolva por completo os agregados envolvidos na mistura. Hoje são encontradas emulsões produzidas especificamente para cada tipo de solo, levando em consideração as características do agregado (JORGE, 2014).

Para Gondim (2008), a emulsão pode ser definida como um mistura heterogênea de dois ou mais componentes não miscíveis entre si, onde ao menos um dos componentes é a fase dispersante e o outro a fase dispersa. Uma emulsão asfáltica é onde a fase dispersante é constituída pela substância polar, ou seja, o cimento asfáltico está espalhado em uma fase aquosa composta por ácido, emulsificante, água e solvente.

A emulsão asfáltica é aplicada preferencialmente a partículas finas. Já a espuma de asfalto se aplica exclusivamente às partículas finas, produzindo “juntas soldadas” de betume e finos. A emulsão engloba até mesmo as partículas maiores do agregado, enquanto a espuma de asfalto recobre exclusivamente as menores partículas. (Gondim 2008)

Conforme a ABEDA (2001), as emulsões asfálticas são obtidas pelo aquecimento do CAP próximo de 140°C e da fase aquosa até 55°C. Em seguida eles são passados em um moinho coloidal, o qual fornece uma energia de dispersão que tritura o CAP e este fica suspenso na água. O agente emulsificante evita que o asfalto triturado volte a se ligar reduzindo sua tensão superficial. Este processo de produção pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 10 - Processo de Produção de Emulsão Asfáltica.



Fonte: Adaptado Sant'ana (2009)

Com a finalidade de facilitar a escolha da emulsão asfáltica mais adequada, a ABEDA (2001) classifica as emulsões asfálticas nos seguintes tipos:

a) RR-1C: emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida, com teor de resíduo asfáltico no mínimo de 62% e viscosidade Saybolt Furol a 50°C entre 20 e 90 s (baixa viscosidade) e desemulsibilidade superior a 50%;

b) RR-2C: emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida, com teor de resíduo asfáltico no mínimo de 67% e viscosidade Saybolt Furol a 50 °C entre 100 e 400 s (alta viscosidade) e desemulsibilidade não inferior a 50%;

c) RM-1C: emulsão asfáltica catiônica de ruptura média, com teor de resíduo asfáltico no mínimo de 62% e viscosidade Saybolt Furol a 50 °C entre 20 e 200 s, teor de solvente destilado de no máximo 12% e desemulsibilidade inferior a 50%;

d) RM-2C: emulsão asfáltica catiônica de ruptura média, com teor de resíduo asfáltico no mínimo de 65% e viscosidade Saybolt Furol a 50 °C entre 100 e 400 s, teor de solvente destilado entre 3 e 12% e desemulsibilidade inferior a 50%;

e) RL-1C: emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta, com teor de resíduo asfáltico no mínimo de 60% e viscosidade Saybolt Furol a 50 °C de no máximo 70 s. Não apresenta solvente em sua constituição. Não se faz o ensaio de desemulsibilidade para caracterizá-la, e sim o teste com cimento ou com filer silícico, dependendo do agregado mineral que for usado;

f) LA-1C: emulsão asfáltica catiônica para lama asfáltica, com teor de resíduo asfáltico no mínimo de 58% e viscosidade Saybolt Furol a 25 °C máxima de 100 s, e teor máximo de 2% no ensaio de mistura com cimento;

g) LA-2C: emulsão asfáltica catiônica para lama asfáltica, com teor de resíduo asfáltico no mínimo de 58% e viscosidade Saybolt Furol a 25°C máxima de 100 s, e não se exige o ensaio de mistura com cimento.

E para uma melhor utilização, a ABEDA, ainda disponibiliza uma tabela com as devidas recomendações de como e quando utilizar cada tipo de emulsão. No Quadro 4, é possível visualizar tais recomendações.

Quadro 4 - Emulsões recomendadas para cada tipo de serviço.

Serviços a Frio	** Emulsões Asfálticas
Capa Selante / Banho Diluído	*RR-1C; *RR-2C; *RL-1C
Pintura de Ligação	*RR-1C; *RR-2C; *RM-1C; *RM-2C; *RL-1C
Selagem de Fissuras	*RR-1C; *RL-1C
Tratamento Antipó	RR-1C; RR-2C; RL-1C
Macadame Betuminoso	*RR-2C
Tratamento Superficial por Penetração	*RR-1C; *RR-2C
Areia-Asfalto	*RL-1C
Pré-Misturados	*RM-1C; *RM-2C; *RL-1C
Tapa-Buraco	*RR-1C; RM-1C; RM-2C; *RL-1C
Lama Asfáltica	*RL-1C; *LA-1C; LA-2C; *LA-E
Estabilização Solo-Emulsão	RL-1C; LA-1C; LA-2C; LA-E
Microrrevestimento Asfáltico	Emulsão Asfáltica com Polímero

* Dependendo do projeto e das especificações de serviço, podem ser modificadas por polímeros.

** Geralmente Empregadas.

Fonte: ABEDA (2001)

2.5.2.4 Aditivos Fluidos

Entre os aditivos, se destaca a utilização de um reagente, tal quanto à dosagem do estabilizante, depende, dentre outros fatores: do tipo de solo, custo do material, e condições específicas do dimensionamento. Exemplificam-se como tais materiais (ECOLOPAVI®, 2017):

a) Sulfato de alumínio: sendo em um sal químico metálico, solúvel em água, (figura 12). Atua como um acelerador da reação entre os componentes do aditivo químico hidrofobante e do solo. Forma-se, conseqüentemente, um composto metalo-orgânico insolúvel, permanente e impermeável, recomendado para tratamento de

solos não plásticos, de predominâncias arenosas e/ou argiloarenosas, desde que os resultados dos ensaios laboratoriais atendam as especificações técnicas requeridas pelo projeto. Na Figura 11 podemos visualizar a aplicação através de caminhão pipa, da solução de sulfato de alumínio dissolvido em água

Figura 11 - Aplicação da Solução de Sulfato de Alumínio.



Fonte: Dynasolo.

2.5.2.5 CAP (Concreto Asfáltico de Petróleo)

Segundo o Dnit (2006), o CAP é o produto mais utilizado na pavimentação, apesar de suas limitações de desempenho. O uso de CAP em revestimentos permite a construção de pavimentos flexíveis de durabilidade razoável, ele é classificado por penetração em todo o território nacional e suas especificações estão prescritas no Regulamento Técnico 03/2005.

Tipos de CAP:

- a) CAP-30/45
- b) CAP-50/70
- c) CAP-85/100
- d) CAP-150/200.

As temperaturas de usinagem e compactação de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) são determinadas em campo através da construção das curvas de temperatura versus viscosidade. Onde as temperaturas de usinagem

devem estar situadas na faixa de viscosidade compreendida entre 75 e 150 SSF, preferencialmente entre 75 e 95 SSF. Já a compactação deve ser realizada na faixa de temperatura cuja viscosidade está compreendida entre 125 e 155 SSF.

Pode ser utilizado na confecção de misturas asfálticas tipo:

- a) CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente
- (b) PMQ (Pré-Misturado a Quente).

2.5.2.6 Con-Aid / CBR Plus

Segundo o manual do produto e execução Con-Aid/ CBR Plus (2010, p.06), o aditivo é um produto líquido complexo reativo ao cátion fabricado especificamente para a estabilização permanente de solos. Ele muda a natureza das propriedades de absorção da água dos solos de hidrófila (afinidade por água) para hidrófoba (repelente a água), especialmente das partículas de mineral de argila.

O tratamento é somente com água + produto + solo, tornando a camada estabilizada rígida e impermeável. Isto torna sua aplicação muito mais simples, rápida, econômica e principalmente evitando danos a saúde dos profissionais que o manipulam.

O produto aumenta o Índice de Suporte Califórnia em até 600% dependendo do tipo de solo, diminuindo consideravelmente a expansão. Este aumento se dá naturalmente, ou seja, proporciona aumento da resistência natural do solo, pela aglutinação de partículas e retirada da água adsorvida e absorvida. Conforme o fabricante, a utilização deste aditivo serve para qualquer tipo de solo argiloso ou que tenha no mínimo 5% de argila na sua concepção. Além do melhoramento nas características físicas e químicas do solo, outra vantagem é a redução considerável no desprendimento de pó.

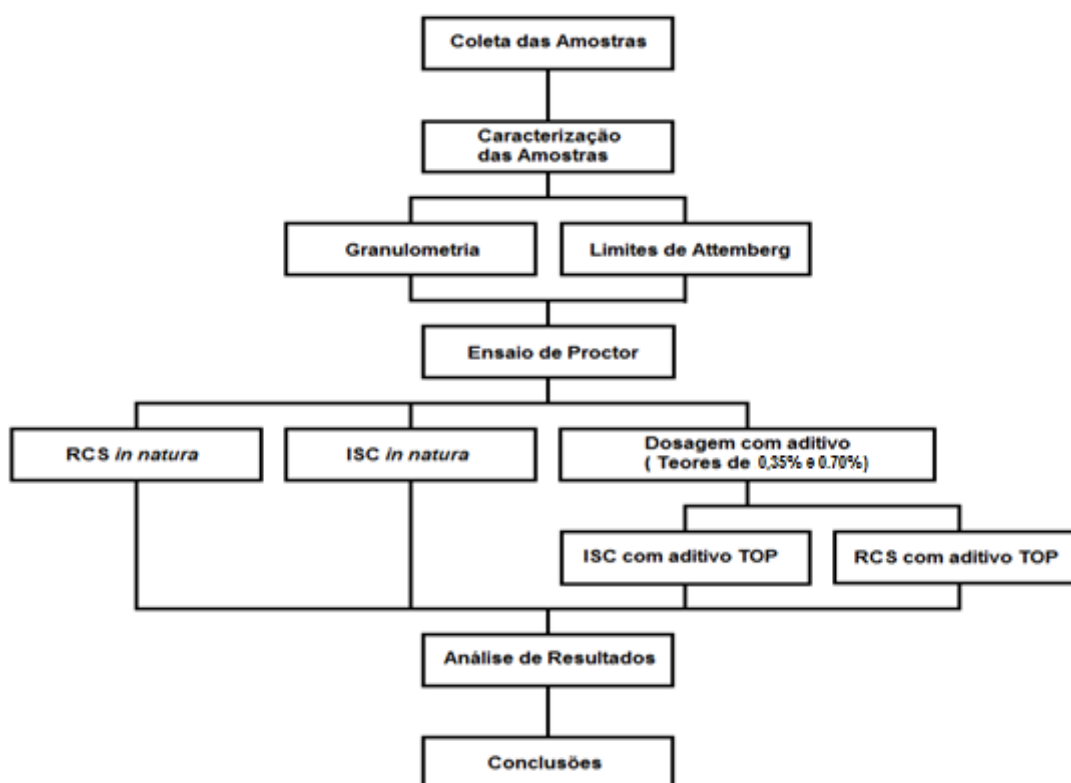
Ainda segundo o fabricante, atualmente a questão ambiental é de grande importância. O produto Con-Aid/CBR Plus têm a certificação ambiental conhecida por “Selo Verde”, que atesta a qualidade ecológica e socioambiental. Além de não agredir a natureza, o aditivo pode ser misturado ao solo manualmente por não ser tóxico nem corrosivo.

3 METODOLOGIA

Para a execução do estudo, seguiu-se os métodos, com o propósito de atender os objetivos a serem desenvolvidos neste trabalho, foram coletadas amostras de solo em jazida pré-definida, onde posteriormente foi feita sua classificação em laboratório para se obter sua Distribuição Granulométrica, Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e o Índice de Grupo. Paralelo a isso, foram feitos ensaios mecânicos para se obter o Índice de Suporte Califórnia (ISC) e o ensaio de compactação para avaliar a resistência à compressão simples (RCS).

Ao final desse processo, foi feito uma análise dos resultados para que se pudesse então aplicar dosagens pré-definidas e então poder medir novamente seu Índice de suporte Califórnia (ISC) e Resistência à Compressão Simples (RCS), e chegar aos teores exatos que servirão de base para serem utilizados em desenvolvimentos e execuções de projetos de pavimentação posteriores, a fim de facilitar a empregabilidade do aditivo e chegar aos resultados esperados. Para ilustrar este processo, segue o fluxograma da Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma da Metodologia.



Fonte: Autor (2020)

3.1 COLETA DE AMOSTRAS

As amostras de solo para a realização dos ensaios exigidos pelo DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT) para uma correta classificação e posterior estabilização com aditivos, foram retiradas na jazida, localizada em Novo Hamburgo. A jazida é devidamente licenciada. A Figura 13 mostra a localização da jazida.

Figura 13 - Localização da Jazida.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 14 traz a imagem aérea da jazida onde foram coletas as amostras de solo para desenvolver os ensaios.

Figura 14 - Imagem aérea da Jazida.



FONTE: Google Maps (2020)

No momento da coleta das amostras, teve-se o cuidado de realizar a retirada da uma camada superficial do solo, chamada de camada de terra vegetal, de modo a assegurar que o material recolhido, de fato, fosse representativo da região escolhida. As amostras foram removidas de uma profundidade de 40 cm, com o auxílio de uma escavadeira, cedida pela própria jazida.

Na Figura 15, pode-se ver a retirada das amostras na jazida.

Figura 15 - Coleta das amostras de solo – Argila.



Fonte: Autor (2020)

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A caracterização das amostras foi realizada através da tabela do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e da tabela sugerida pela Transportation Research Board (TRB), às quais podem ser visualizadas nos itens 2.2.3 e 2.2.4, respectivamente.

Não obstante, para realizar tal classificação são necessárias algumas informações sobre o solo, tais como: distribuição granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade e, conseqüentemente, índice de plasticidade. Estas informações foram obtidas de forma experimental e foram explanadas.

3.2.1 Granulometria

A distribuição granulométrica das amostras foi feita por peneiramento com as peneiras disponíveis no laboratório de solos da UNISINOS, campus São Leopoldo. Realizou-se o ensaio seguindo a norma rodoviária DNER-ME 080/94, utilizando-se o conjunto das peneiras de 50mm / 38mm / 25mm / 19mm / 9,5mm / 4,8mm / 2,0mm / 1,2mm / 0,6mm / 0,42mm / 0,30mm / 0,15mm e 0,075 mm.

Para o ensaio de granulometria, utilizou-se uma fração da amostra que foi passada na peneira de 4,8 mm.

A realização do ensaio se deu através da combinação de sedimentação, peneiramento grosso e peneiramento fino de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016) estão mostrados nas Figuras 16A e 16B respectivamente, que representam as etapas do ensaio.

Figura 16 - Processos de sedimentação e peneiramento.



Fonte: Autor (2020)

3.2.2 Limites de Atterberg

O método de limites de Atterberg, também conhecido por limites de consistência de solos, avalia a natureza dos mesmos e este método leva este nome, pois foi criado por Albert Atterberg.

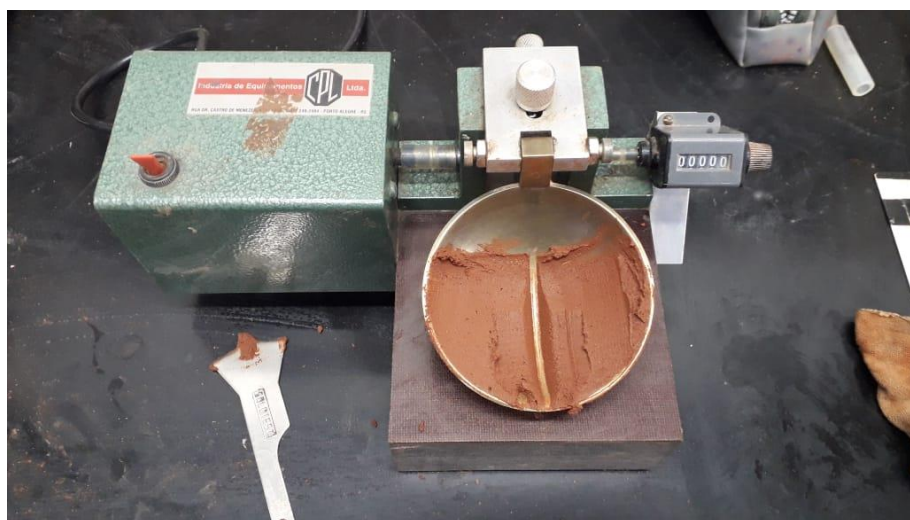
Através de testes e ensaios em laboratório é possível definir o limite de liquidez, o limite de plasticidade e o limite de contração de um solo.

3.2.2.1 Limite de Liquidez

Segundo a norma rodoviária DNER-ME 122/1994, por este método, se mede o teor de umidade do solo a qual estabelece o método de referência e o método expedito, ele define a transição do estado plástico ao estado líquido, expresso em porcentagem.

Para determinar o LL se obtém uma amostra do solo a qual se quer ensaiar, neste caso a argila propriamente dita. Após, se utiliza o aparelho de Casagrande, ao qual mostra na Figura 17, que sob a ação de 25 golpes da concha sobre a base do aparelho, necessários para unir as bordas inferiores de uma canelura feita na massa de solo disposta sobre a concha. É importante que o aparelho esteja calibrado antes da realização do ensaio, seguindo a norma DNER-ME 122/1994.

Figura 17 - Aparelho de Casagrande.



Fonte: Autor (2020)

3.2.2.2 limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade

Determina-se o limite de plasticidade (LP), dos solos a partir das normativas impostas pela norma DNER-ME 082/94. Segundo esta norma, se define o teor de umidade do solo, quando o mesmo passa de estado plástico para estado semi-

sólido, isso ocorre quando o solo perde a capacidade de ser moldado e se torna quebradiço.

Para que a determinação da LP ocorra, obtém-se uma amostra do solo em estudo, e de acordo com a norma DNER-ME 041/1994, norma pela qual se normatiza a preparação de amostras para sua caracterização à norma 082/1994, ainda prevê a utilização de uma placa de vidro de superfície esmerilhada como base para execução dos cilindros. A Figura 18 apresenta a determinação do limite de plasticidade.

Figura 18 - Determinação do limite de plasticidade.



Fonte: Autor (2020)

Após se obter estes resultados, pode-se determinar ainda o índice de plasticidade IP, resultado da diferença entre LL e LP, conforme a Equação 3.

$$IP = LL - LP \quad (\text{EQ.})3$$

3.2.2.3 Peso Específico dos Grãos

A determinação do peso específico das amostras foi feita com o auxílio do agitador mecânico para dispersão do solo, balão volumétrico e bomba de vácuo, de acordo com as prescrições do anexo b da NBR 6458 (ABNT, 2016). Para a

preparação das amostras, foi utilizada água destilada para completar a imersão, que respeitou um período de 12 horas para que fosse feita a dispersão e os procedimentos seguintes com o balão volumétrico e aplicação de pressão a vácuo. A Figura 19 ilustra a realização do ensaio.

Figura 19 - Balão volumétrico para realização do ensaio do peso específico.



Fonte: Autor (2020)

3.2.2.4 Compactação

Para o ensaio de compactação serviu para determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca após a compactação da amostra. O procedimento decorreu para a realização do ensaio seguindo o que a norma prescreve NBR 7182 (ABNT, 2016). Para o solo seco e sem aditivo, foi separada uma amostra e passada na peneira nº4 (4,8mm). Foi utilizada uma quantidade deste material para realizar a determinação de umidade higroscópica, pelo método da frigideira.

Para a compactação, foi utilizada energia de compactação intermediária, onde por orientação da norma, são necessárias três camadas com 26 golpes cada uma para que se obedeça à compactação.

Os limites de Atterberg são utilizados para estimar e definir a umidade inicial, para que se consiga realizar os ensaios. Repetiu-se com diferentes umidades para que se garantissem ao menos três pontos crescentes e dois decrescentes na criação da curva de compactação do solo

Para este ensaio, a umidade foi aumentada em 4% a cada ponto da curva, já que conforme ia se observando nos ensaios anteriores, 2%, quase não alterava a umidade do solo.

3.3 ENSAIO DE PRÓCTOR

Segundo a norma DNIT 164 (2013), o ensaio de Proctor tem como objetivo a obtenção do teor de umidade ótima do solo, a qual deixa o mesmo mais próximo possível da máxima densidade teórica de compactação.

Esta norma estabelece três energias de compactação distintas, sendo elas a compactação normal, compactação intermediária e compactação modificada. A normal é utilizada para solos de subleito, a compactação intermediária utilizada para materiais com aplicação como sub-base e a compactação modificada é utilizada para bases. Para trabalho foi utilizado o ensaio Proctor intermediário, pois o trabalho visa estabilizar o solo com aditivos para sub-bases de pavimentos. As Figuras 20 A,B,C e D a seguir mostra equipamentos do ensaio de Proctor, ensaio de Frigideria, homogeneização do solo, soquete e molde de CBR, respectivamente.

Figura 20 - Etapas do Ensaio de Próctor



FONTE: AUTOR (2020)

3.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Este ensaio quando realizado, visa caracterizar a mecânica do solo, o comportamento tensão-deformação e contribui para determinação do índice de suporte Califórnia (ISC) e Resistência a Compressão Simples (RCS).

3.4.1 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Conforme a norma DNIT 172 (2016), o objetivo do ensaio é medir a capacidade de expansão de um solo saturado a partir de amostras não-trabalhadas e indicar também a perda de resistência do solo devido a sua saturação. A partir deste ensaio, se determina a pressão necessária para a penetração de um pistão no material testado, comparado à pressão necessária para penetrar o mesmo pistão em uma brita graduada padrão.

Para determinar o índice de suporte Califórnia e a expansão no laboratório, foram moldados os CBR's para o solo referência sem adição química e também foram moldados os CBR's com as respectivas dosagens de aditivo.

Durante o processo de moldagem, se obedeceram as cinco camadas e o número de golpes correspondentes a energia intermediária. Após a moldagem, os CBR's foram levados ao tanque para imersão, que permaneceram por 96 horas antes de serem rompidos para se obter as leituras no deflectômetro.

A partir da execução do ensaio é possível obter a expansão e também o próprio ISC das amostras.

A norma DNIT 172 (2016) me considera o maior valor entre os ISC's referentes à pressão corrigida para as penetrações de 2,54 e 5,08mm como o ISC representativo do solo.

As Figuras 21A e 21B a seguir, mostram uma prensa e um molde que fazem parte da etapa do processo do rompimento dos CBR's.

Figura 21 - Processo de rompimento dos CBR's.



FONTE: AUTOR (2020)

3.4.2 Resistência a Compressão Simples (RCS)

Segundo a NBR12770/1992, este ensaio prevê a determinação da resistência à compressão simples de corpos de prova constituídos de solos coesivos, mediante aplicação de uma carga axial, com controle de deformação. Estes corpos de prova podem ser indeformados, obtidos por compactação ou ainda por remoldagem, com Proctor menor que o utilizado anteriormente, com umidade ótima e peso específico máximo, utilizando-se de energia intermediária. Somado a isso, a norma NBR 12025

(2012), exige que os ensaios sejam realizados com amostras de solo puro e solo natural nas faixas granulométricas em estudo.

Para cada composição sejam compactados três corpos de prova, os quais, assim como nos ensaios anteriores, sejam levados à câmara úmida para o processo de cura após a compactação. Após este processo, se obedece aos mesmos períodos de cura aplicados aos ensaios CBR, ou seja, foram respeitados 4 dias.

À medida que as amostras sofrem compressão, se obtêm os valores de pressão aplicados sobre elas. Com posse de tais dados, se trabalha com as médias dos valores dos três corpos de prova por estabilizante.

O rompimento dos CBR's foi realizado na prensa hidráulica do laboratório de matérias da UNISINOS, como mostram as Figuras 22 A , B, C e D.

Figuras 22 - Processo de rompimento dos CBR's





Fonte: Elaborado pelo Autor

3.5 OBRA REALIZADA COM O ADITIVO

Durante a elaboração do trabalho, foi-se conhecer o processo de aplicação do aditivo na Rua Ernesto Augusto Mandier, um acesso de área rural a RSC 471 que tem por função escoar a produção fumageira na cidade de Santa Cruz do Sul – RS. Na ocasião ocorreu a aplicação em um trecho de 300 metros de estrada.

Ao chegar ao local, se pode acompanhar todo o processo desde a dissolução do aditivo em um tambor e posteriormente em caminhão pipa. O processo se dá desde o momento em que a empresa contratada para executar a obra, transporta ou não material para compor a sub-base do leito da estrada, este material é regularizado e recebe a primeira molhagem, como podemos ver na Figura 23.

Figura 23 - Caminhão pipa molhando o solo com solução com aditivo



Fonte: Autor (2020)

No processo seguinte, passa-se a patrol motoniveladora e se faz a escarificação do material, para que ele fique solto e vai homogeneizando como se vê nas Figuras 24 e 25.

Figura 24 - Patrol motoniveladora escarificando o solo



Fonte: Autor (2020)

Figura 25 - Material solto após o processo de escarificação



Fonte: Autor (2020)

Após o processo de escarificação e como o solo que foi utilizado era um material de segunda classe, que continha muitos fragmentos de rochas (pedras) de tamanhos variados, necessitou-se que fosse feita uma moagem para diminuir de tamanho deste material, então foi passado uma maquina chamada PT 400, que tritura materiais de vários tamanhos, deixando seus grãos menores e mais homogêneos, como se vê na Figuras 26 e 27.

Figura 26 - Máquina PT-400 executando a moagem das pedras



Fonte: Autor (2020)

Figura 27 - Solo depois que passou pelo processo de moagem



Fonte: Autor (2020)

Dando seqüência no processo, o solo é novamente molhado com a solução de água mais aditivo e, então, a Pat rol motoniveladora para regularizando novamente o solo, como se vê nas Figuras 28 e 29.

Figura 28 - Caminhão pipa molhando o solo com solução de aditivo.



Fonte: Autor (2020)

Figura 29 - Patrol motoniveladora regularizando o solo



Fonte: Autor (2020)

Após este processo, o caminhão pipa passa novamente e faz uma nova umidificação no solo com solução de aditivo e então o rolo compressor executa a compactação, como mostra na Figura 30.

Figura 30 - Rolo compressor passando para compactar o solo.



Fonte: Autor (2020)

Por fim, a estrada é novamente regularizada pela motoniveladora e o rolo também é passado dando acabamento e assim se encerra o processo deixando a estrada como maior resistência e com boas condições de trafegabilidade, diminuindo a poeira, dando maior segurança e conforto para seus usuários, como mostra as Figura 31 e 32.

Figura 31 - Patrol motoniveladora regularizando o pavimento



Fonte: Autor (2020)

Figura 32 - Estrada pronta para o uso.



Fonte: Autor (2020)

O fornecedor de aditivo que é o Con-Aid, empresa de origem Sul Africana, mas que atua no Brasil desde 2007, tem por objetivo desenvolver e fornecer

produtos que auxiliam a engenharia civil em construir de forma econômica e inteligente, estradas e ruas não pavimentadas, diminuindo os custos de manutenção.

Além desta obra que se conseguiu acompanhar, o Con-Aid, informa que sua área de maior atuação, é em estradas em cidades no estado de Santa Catarina, porém foram feitas obras no Paraná, São Paulo e Minas Gerais e, também, no exterior.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo traz os resultados obtidos sob análise a partir das referências normativas, nos ensaios realizados no laboratório e apresentados na metodologia.

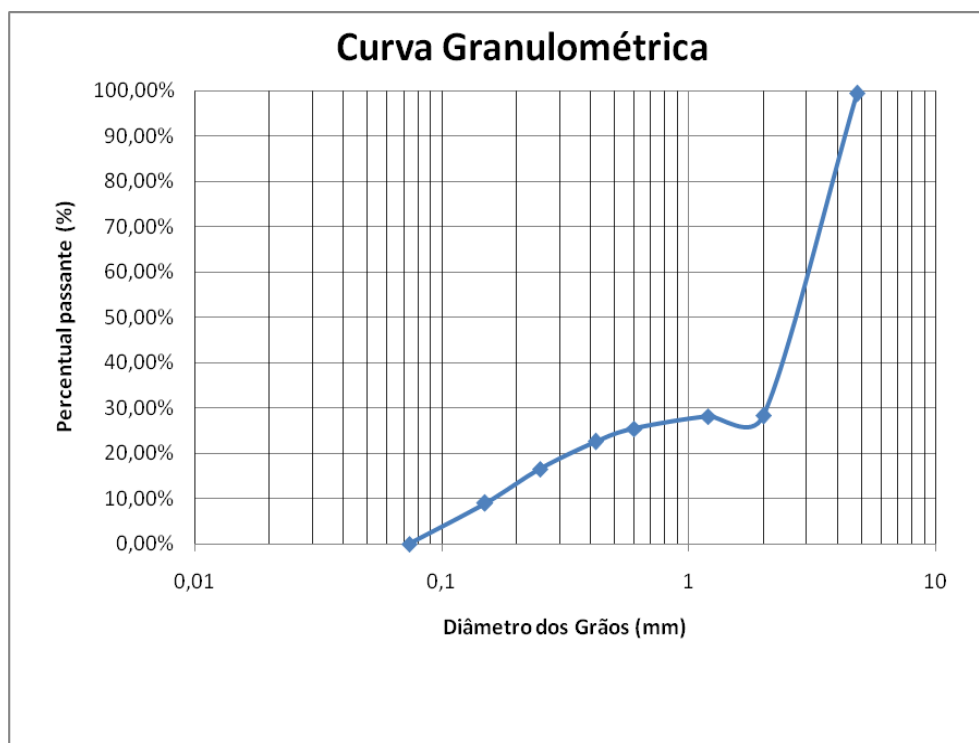
4.1 CARACTERIZAÇÕES DO SOLO

A caracterização física do solo em estudo trouxe aqui resultados obtidos nos ensaios.

4.1.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica é resultado do processo de peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação e dessa forma se determina as características do solo estudado. O Gráfico 1 mostra a curva granulométrica do solo argiloso ensaiado.

Gráfico 1 - Curva Granulométrica



Fonte: Elaborado pelo Autor

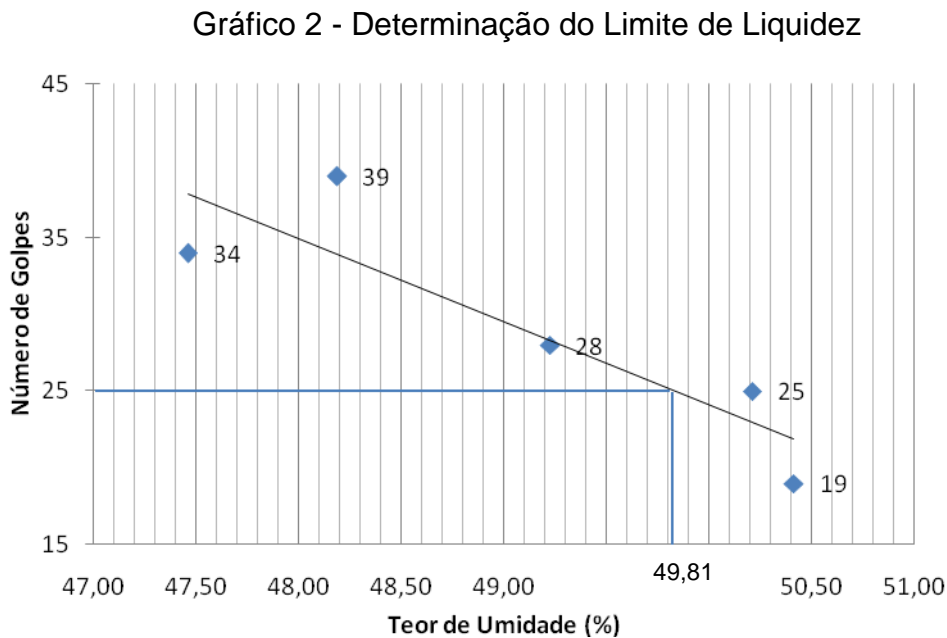
Observando a curva granulométrica, e se tratando de um material granular, com 9% da amostra passando pela peneira nº200, o material possui requisitos mínimos que atende à sua utilização para bases e sub-bases de pavimentos.

4.1.2 Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg resultaram a partir da execução dos procedimentos descritos anteriormente na metodologia.

4.1.2.1 Limite de Liquidez

Os resultados de limite de liquidez obtidos da realização dos ensaios a partir de cinco pontos, obedecendo aos intervalos de golpes para cada ponto para se chegar ao teor de umidade ótima. O Gráfico 2 mostra que aos 25 golpes, se obteve um teor de umidade de 49,81%:



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.1.2.2 Limite de Plasticidade

Através do ensaio para determinar o limite de plasticidade do solo em estudo, se obteve um valor de umidade média resultante entre as 5 cápsulas com amostras de solo que foram secas em estufa de 28,98%. Com os valores de limite de liquidez e limite de plasticidades conhecidos, foi possível calcular o índice de plasticidade do solo. Os valores obtidos para os parâmetros de consistência do solo estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de Consistência do solo.

PARÂMETRO	VALOR
Limite de Liquidez	49,81%
Limite de Plasticidade	28,98%
Índice de Plasticidade	20,83%

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.1.3 Classificação do Solo

A partir dos valores obtidos dos ensaios da análise granulométrica e os parâmetros de consistência resultantes dos ensaios de Atterberg, permitiram determinar a caracterização do solo. Segundo a classificação da TRB, adotada pela AASHTO, mais usual na caracterização de solos granulares empregados em estradas, a partir do cálculo do Índice de Grupo (IG), que foi calculado e se chegou a 0, da porcentagem que passa pela peneira de nº 200 e dos índices de consistência, o solo estudado foi classificado como A-2-7, ou seja, um solo granular com finos, podendo apresentar boa plasticidade com comportamento excelente a bom indicado para subleito em estradas e rodovias. O material atende à utilização em bases e sub-bases de estradas e pavimentos.

4.1.4 Peso Específico Real dos Grãos

O ensaio para determinação do peso específico realizado de acordo com o item 3.2.2.3 resultou nos valores que estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Determinação do Peso Específico Real dos Grãos

Temperatura °C	Picnômetro + Água (g)	Picnômetro + Água + Solo(g)	Solo Seco (g)	Água Deslocada (g)	Peso Específico dos Grãos (g/cm ³)
22,7°	627,68	659,34	50	31,66	2,72

Fonte: Elaborado pelo Autor

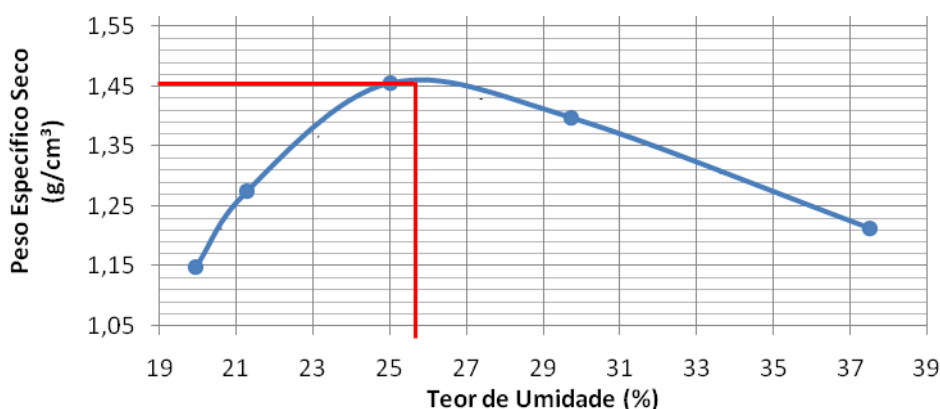
Com a realização do ensaio, se obteve resultado que possibilitaram determinar o peso específico real dos grãos de 2,72 g/cm³.

4.1.5 Ensaio de Compactação

Para definir a umidade ótima do solo, realizou-se o ensaio de compactação. Pelo ensaio, foram obtidos cinco pontos para que traçar uma curva onde se obteve através das orientações da norma NBR 7182, onde dois pontos estão no ramo seco, um ponto muito próximo da umidade ótima e mais dois pontos no ramo úmido.

Os resultados do ensaio de compactação intermediário, referentes à amostra do solo, estão expressos no Gráfico 3. Os valores utilizados para o traçado das curvas de compactação se encontram no Apêndice A.

.Gráfico 3 - Curva obtida pelo ensaio de compactação intermediário referente à amostra do solo



FONTE: Elaborado pelo Autor

A partir da curva de compactação, resulta a umidade ótima do solo, a qual, conseqüentemente, indica o peso específico aparente de seco. O valor de umidade ótima e densidade seca aparente do solo estão representados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultado da umidade ótima e densidade seca aparente do solo.

Amostra	Argila
H_{ot} (%)	25,5
γ_d (kN/m³)	1,46

Fonte: Autor (2020)

Por orientação do fabricante, o aditivo não altera a umidade ótima e nem o peso específico seco do solo, então sua diluição é direta na água não ocorrendo alteração na compactação, não necessitando de novos ensaios de compactação para o uso do aditivo.

Com objetivo de reproduzir a pior situação, com a probabilidade de acontecer em campo, os corpos de prova com aditivo permaneceram imersos por 96 horas, e feita a leitura da expansão antes de serem retirados do tanque.

Na Tabela 6, constam os valores das expansões resultantes para cada concentração de aditivo. Com o resultado da umidade ótima, deu prosseguimento no ensaio de Índice de Suporte Califórnia.

Tabela 6 - Expansão dos corpos de prova imersos por 96 horas.

Adição	Resultado da Expansão
CP sem Aditivo	0,20%
CP com 0,35% aditivo	0,05%
CP com 0,70% aditivo	0,02%

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2 ANÁLISES DE RESISTÊNCIAS

Através dos ensaios realizados para analisar a resistência do solo estudado, aqui estão os resultados obtidos.

4.2.1 Resistência a Compressão Simples

Ao analisar a resistência a compressão simples, com a cura seca num período de 4 dias, a tensão de ruptura obtida pelo software da prensa hidráulica EMIC. Levando em consideração a carga máxima em Megapascal (MPa), observou-se que a amostra de solo referência sem aditivo apresentou 41,62 MPa de resistência à compressão simples, enquanto com a adições de 0,35% e 0,70% apresentaram 38,16 MPa e 40,74 MPa respectivamente. Apesar de ter ocorrido um incremento do aditivo, as mesmas não atingiram a mesma resistência do solo referência no período de 4 dias, evidenciando que para a resistência a compressão simples nesse período de cura, não agregaram uma resistência que se esperaria de um aditivo .estabilizante, apesar de a dosagem de 0,70% ficar bem próxima dos solo referência. Os técnicos da empresa Con-Aid sugeriram verificar estes ensaios em idades de cura de 7 dias, utilizando a cura seca. Os resultados obtidos dos corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão simples com idade de quatro dias estão representados na Tabela 7.

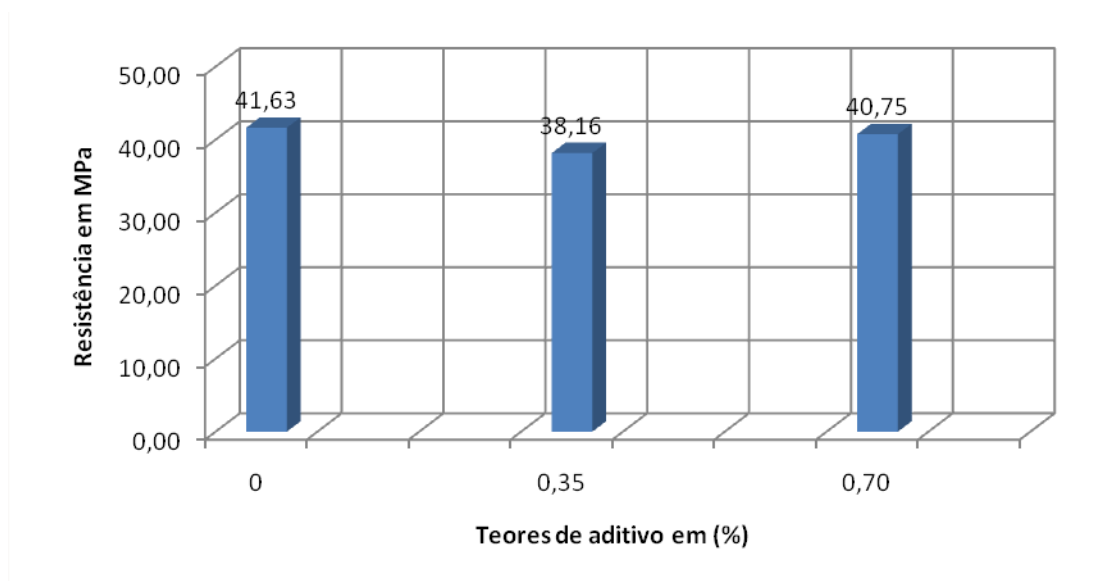
Tabela 7 - Determinação da resistência a compressão simples em 4 dias.

Teor de aditivo %	Nº CP	Diâmetro médio CP (mm)	Área secção transversal (cm ²)	Altura (mm)	Carga Máxima (MPa)	Tensão máxima (MPa)
0	1	50,3	19,87	100,2	46,13	41,62
	2	51,2	20,59	100,8	30,31	
	3	50,7	20,19	100,6	48,44	
0,35	4	50,6	20,11	100,6	20,20	38,16
	5	51,1	20,51	101,2	46,03	
	6	50,8	20,27	101,5	48,25	
0,70	7	50,3	19,87	100,8	39,85	40,74
	8	50,5	20,03	100,6	39,61	
	9	50,9	20,35	100,9	42,78	

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados obtidos a partir das resistências para idade de quatros dias estão expressos no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Resistência em MPa em 4 dias



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2.2 Índice de Suporte Califórnia

Seguindo as premissas do item 3.4.1, para determinar o Índice de Suporte Califórnia, foram feitas leituras no deflectômetro da prensa Califórnia Helvan durante a penetração do pistão para as dosagens de 0,35% e 0,70% com o aditivo CBR Plus da Con-Aid, e para o solo referência sem qualquer adição.

Durante um período de 10 minutos foram feitas leituras relacionando os valores da penetração em mm pela função do tempo em minutos.

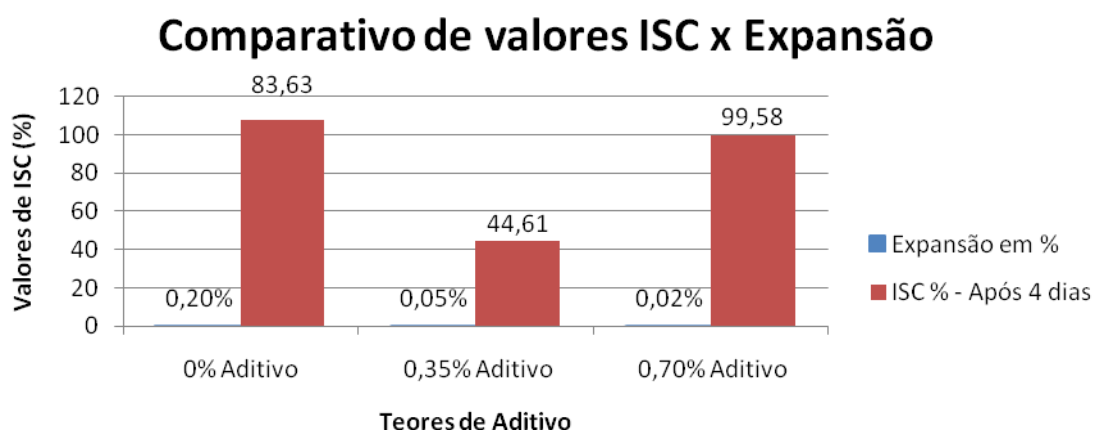
Os resultados obtidos através das médias dos ensaios realizados em três CP's tanto para o solo referência como para os solos com aditivo, com cura de quatro dias totalmente saturados, mostraram que houve uma diminuição no suporte de carga, mas também houve a diminuição na expansão, pois o CBR Plus, da Con-Aid, possui propriedades hidrofugantes, que repelem a água mas também retardam o tempo de reação junto ao solo.

Obtendo os resultados, tanto das leituras de expansão, quanto dos Índices de Suporte Califórnia, informando que não houve distorção de um resultado para outro, se observou que com a presença de água, o aditivo retarda o tempo para que haja a reação para com o solo. As resistências com 0,35% e 0,70% de aditivo diminuiram em relação ao solo referência, embora a amostra com 0,70% tenha dobrado a

resistência em relação à amostra com 0,35%, mesmo assim ficou abaixo do solo *in natura*. Conforme orientação técnica da empresa, possivelmente a presença da água em função da imersão para medir a expansão, retarde esse incremento de resistência. Por isso se fez outros ensaios com cura seca para rompimento em sete dias para realizar uma nova análise.

No Gráfico 5, se tem um comparativo dos ISC's e expansões do solo referência com os aditivados nas suas concentrações, seguindo as recomendações do fabricante e da NBR.

Gráfico 5 - Comparativo do ISC do solo referência com o solo aditivado e a expansão



Fonte: Elaborado pelo Autor

A intenção de apresentar este comparativo de resultados foi possibilitar a visualização da relação dos valores obtidos com o ensaio de ISC, apresentado anteriormente no item 4.2.1. Os valores de pressão versus penetração permitem a incidência sobre a capacidade de suporte do solo em decorrência do uso de aditivo. Portanto, o solo referência possui uma capacidade de suporte maior com o mesmo tempo de cura em relação aos com aditivo, quando estão totalmente saturados, porém, observou-se que com a mesma porcentagem de aditivo, porém substituindo a cura por imersão para cura seca e com um período de sete dias, houve um aumento significativo na capacidade de suporte do solo. A Tabela 8 mostra o comportamento nas capacidades de suporte de carga, com a alteração do período e modo de cura.

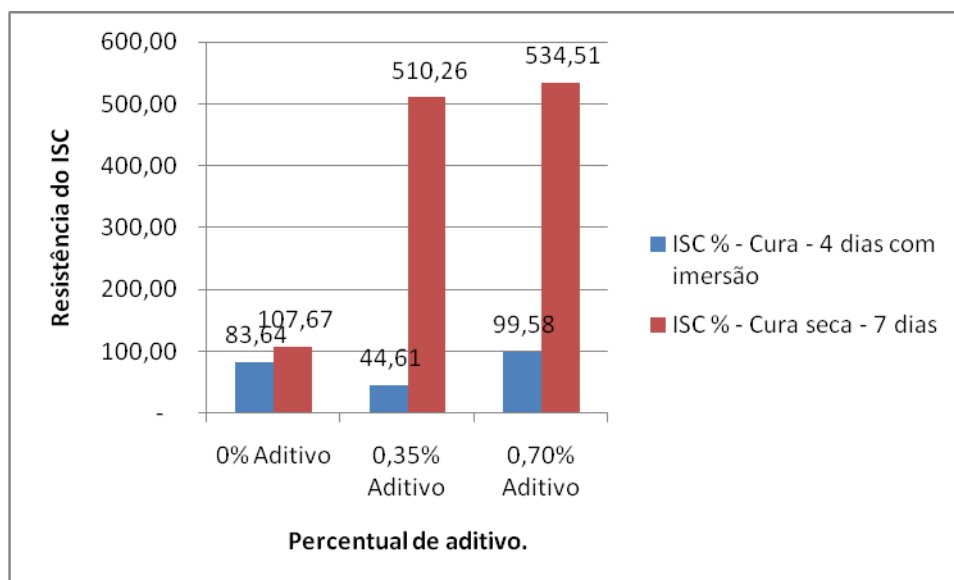
Tabela 8 - ISC com dois tipos diferentes de cura

Amostra / Adição	ISC % - Cura - 4 dias com imersão	ISC % - Cura seca - 7 dias
0% Aditivo	83,64	107,67
0,35% Aditivo	44,61	510,26
0,70% Aditivo	99,58	534,51

Fonte: Elaborado pelo Autor

O Gráfico 6 apresenta o comparativo que mostra a diferença entre o ensaio de ISC com imersão em 4 dias e o ensaio de ISC com cura seca após 7 dias.

Gráfico 6 - Comparativo dos ISC com dois tempos de cura.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Observou-se que na idade de 7 dias com cura seca, conforme orientação técnica, os resultados foram muito superiores em relação aos CP's com cura por imersão, atingindo um CBR com praticamente o mesmo valor para sem aditivo, mas com a presença do aditivo é possível visualizar que é grande o ganho em resistência na capacidade de suporte de no mínimo 5 vezes do valor inicial. Por ele ser hidrofugante, expulsando a água, aglutinando as partículas, ele potencializa o melhoramento da resistência do solo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A amostra teve como caracterização do solo A-2-7 com Índice de Plasticidade de 20,83%, caracterizado pela presença de menos de 35% passante pela peneira de nº 200 caracterizando como sendo um solo de excelente a bom para subleito, servindo assim para utilização em pavimentação. Sabendo destes parâmetros, se pode afirmar que este solo não precisaria de incremento de aditivo pois já possui capacidade de suporte suficiente.

Quanto a Resistência a Compressão Simples, se observou que com o incremento do aditivo no período de 4 dias de cura, não apresentou resultado satisfatório, sendo sugerido pelos técnicos da Con-Aid, que se fizesse um ensaio obedecendo um período de, no mínimo, 7 dias e, então, obteríamos êxito no aumento de resistência, pois o produto precisa deste período para realizar a reação química.

A partir dos Índices de Suporte Califórnia obtidos do solo, conclui-se que o mesmo pode ser utilizado como base que tem como requisito mínimo de 60% e para sub-base que tem requisito mínimo de 20%, para pavimentos urbanos e estradas rurais de tráfego leve, uma vez que possui ISC superior a 60%, então atende para os dois casos. O solo ainda possui um índice de grupo (IG) igual a zero que representa um solo ótimo quanto a sua capacidade de suporte. Ao utilizar estes solos para sub-base haveria economia na espessura de todas as camadas do pavimento, bem como haveria menor energia gasta na produção de agregados utilizados como sub-base e o mais importante e é o que se busca quando se faz este tipo de estudo, menor degradação do meio ambiente. Notou-se ainda que mesmo seguindo as especificações do fabricante, o solo ensaiado no presente trabalho teve uma redução em seu Índice de Suporte Califórnia e na sua expansão, quando colocado na imersão por quatro dias, porém quando submetido a um tempo maior de cura, houve resultado satisfatório, com isso presume-se que a diminuição no ISC tenha relação com o tempo insuficiente para a reação do aditivo com o solo.

Verifica-se que a amostra estabilizada quimicamente adquire características de camada rígida, se fazendo necessário para dimensionamento a consideração de um pavimento invertido no momento do seu dimensionamento

Conclui-se então que o solo estabilizado com o aditivo químico CBR Plus da marca Con-Aid influencia na Resistência à Compressão Simples e dá maior suporte de carga no Índice de Suporte Califórnia do solo e minimiza a expansão do mesmo. Porém, devido à mudança no tipo de cura, houve uma diminuição de resistência para cura umidade e um aumento significativo quando submetido à cura seca e por este motivo, deveriam ser feitos novos ensaios com períodos maiores tanto para cura úmida quanto para cura seca para viabilizar o uso do aditivo e certificar seu efeito, principalmente na cura por imersão, pois é a que mais se assemelha com a realidade do uso em obras.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- A) Analisar solos com mesmas características, porém utilizando traços com agregados para avaliar seu suporte de carga;
- B) Ensaiar outros tipos de solos com propriedades granulométricas diferentes para analisar seu comportamento;
- C) Avaliar a importância das condições de cura (temperatura e umidade) no ganho de resistência com o tempo de cura.

REFERÊNCIAS

- ALBANO, João Fortini. **Evolução das Vias**. UFRGS, 2003
- ALMEIDA, Gil Carvalho Paulo de. **Caracterização Física e Classificação dos Solos**. Juiz de Fora – MG, UFJF, 2005.
- ARRIVABENI, Breno Santos et all. **Uso de Cal na Estabilização Granulométrica e Química de solo de estradas**. Enciclopédia Biosfera, 2016.
- ARRIVABENI, Breno Santos. **Alternativas para Estabilização Granulométrica e Química de Solo de Estradas Florestais**, 2017.
- ASSIS, Rafael. **REGULARIZAÇÃO DE SUBLEITO – Arando o solo**. Brasília 2013.
- ATTON-OKINE, N. O. **Lime treatment of laterite soils and gravels – revisited**. **Construction and Building Materials**, v.9, n.5, p.283-287, 1995.
- AZEVÊDO, André Luis C. de. **Estabilização de Solos com Adição de Cal: Um estudo a respeito da Reversibilidade das Reações que acontecem no solo após a adição do cal**. Dissertação de Mestrado. UFOP Ouro Preto – MG, 2010.
- BALBO, J.T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 558 p.
- BERNUCCI, Liedi Bariani et all. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS: ABEDA, 2006. 504 f.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. 6. ed. 234 p.
- CASTRO, F. J. C. de O. **Contribuição ao Conhecimento e à Determinação da Reatividade de Solos Sesquióxidos Utilizando o Óxido de Cálcio: Aplicação ao Processo de Geopolimerização (Estabilização)**, 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- CAVA, Felipe. **Da Rocha ao Asfalto: A História da Pavimentação**. 2019. Dissertação. São Paulo.
- DALL'IGNA, Gustavo. **Estudos do Comportamento de Solos Quando Estabilizados com Aditivos Químicos**. 2017. Erechim – RS.
- DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 560 p. il.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER ME 082/94: **Solos - Determinação do Limite de Plasticidade**. Brasília, DF, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER ME 122/94: Solos - **Determinação do Limite de Liquidez – Método de Referência e Método Expedito**. Brasília, DF, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT: 164/2013-ME: **Compactação Utilizando Amostras Não Trabalhadas**. Brasília, DF, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT: 172/2016-ME: **Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras Não Trabalhas**. Brasília, DF, 2016.

DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3ª Edição – Rio de Janeiro, 2006

FILHO, Carlos Eduardo Sales Alves. **Correlações para Parâmetros Geotécnicos de Argilas compressíveis com Parâmetro Dinâmico Leve**. UFPO, 2014.

FRANÇA, Fabrício Carlos. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: Estudo de caso com produto "RBI GRADE 81"**. 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

GONDIM, Lilian Medeiros. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agro pólo de Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará**. 2008. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

GUIMARÃES, J.E.P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2ª Ed. São Paulo: PINI, 2002.

HERRIN, M E MITCHELL, H. **Misturas Solo-Cal**. Tradução da Engª Elda Nellis de Castro, Lisboa, 1967. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Tradução nº 1, 74p

HERRIN, M.; MITCHELL, H. **Misturas de Solo-Cal**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação 426, 1968. Rio de Janeiro, Brasil.

JORGE, Fabiano da Silva. **Comportamento de material fresado com adição de cimento Portland e emulsão**. 2014. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2014.

LEPSCH, I. F. **Perfil do solo**. In: MONIZ, A. C. Elementos de Pedologia. São Paulo: Editora Polígono, 1972. P. 335 – 339.

LEVY, Joel. **Subleito e sub-base: suas especificações**. Boletim técnico.

LIMA, D. C. **Estabilização Solo-Cal**. In: 19ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Rio de Janeiro. Anais... p.67-82, 1984.

LOFRANO, Fábio Cunha. **Escoamento em Meios Porosos: Um modelo analítico não Darciano baseado no Princípio da Entropia Máxima**. Tese de Doutorado. São Paulo – SP, 2018.

LOVATO, Rodrigo Silveira. **Estudo do Comportamento Mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. 2004. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MACHADO, C. C.; **Construção e conservação de estradas rurais e florestais**. Viçosa: UFV, 2013.

Manual de Produto e Execução Estabilizador de Solos Con-Aid/CBR Plus versão 2010 – Manual disponibilizado pela empresa em 2020.

MARTINS, Aline et al. **Apostila de Fabricação de Cimento**. 2007. Elaborada por Cimentos Itambé. Disponível em: <<https://www.unochapeco.edu.br/static/data/portal/downloads/1276.pdf>>. Acesso em: 11 de junho de 2020.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2º ed. Editora COPPE: Rio de Janeiro, 2005.

NUGEO. **Elementos sobre solo**. UFJF, 2009.

OLIVEIRA, M. J. G. **Classificação para orientar a manutenção de vias não pavimentadas**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA. Joinville: 2005.

OLIVEIRA, Rodrigo Fidelis Viana de. **Análise de dois solos modificados com cimentos para dimensionamento de pavimentos**. 2011. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

PEREIRA, Djalma; et al. **Sistemas de Transportes**. Curitiba, PR. 2013.

PRUSINSKI, J. R., BHATTACHARJA, S. **Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils**. *Transportation Research Record*, Washington D.C., nº1652, p.215-227, 1999.

ROCHA, M. T, et AL. **Estudo Laboratorial de um Solo Tropical Granular Estabilizado Quimicamente para Fins de Pavimentação**. UFG, Goiás – GO, 2017.

SARTORI, Guilherme. **Estudo de Estabilização de Solos Para Fins de Pavimentação na Região de Campo Mourão** – PR. UTFPR, 2015.

SENÇO, W. DE. **Manual de técnicas de pavimentação**. Ed. Pini: São Paulo, SP. 2008.

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

SILVA, D. P. **Estudo do comportamento geológico de solos estabilizados com cimento: processos gerais de estabilização**. Lisboa: Ministério de obras públicas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1968, 343p. (Especialização).

SOUZA, Ruiteir da Silva. MSc. EXECUÇÃO DE PAVIMENTO – **Regularização, reforço de subleito, sub-base e base estabilizada granulomericamente**. Goiás, 2013.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: Ed. USP/MGraw-Hill, 1977.

VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano Para Base de Pavimentos**. In: Engenharia Civil. PUC - Rio, Rio de Janeiro, 2010.

APÊNDICES

APÊNDICE A – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.

Nº do Cilindro	1	1	1	1	1
Peso do Molde(g)	4490	4490	4490	4490	4490
Volume do Molde(cm ³)	998,35	998,35	998,35	998,35	998,35
Peso da Amostra Úmida + Molde(g)	5865	6035	6305	6300	6155
Peso da Amostra Compactada	1375	1545	1815	1810	1665
Peso Específico Úmido	1,377	1,548	1,818	1,813	1,668
Água acrescentada(g)	51,52	51,52	103,04	103,04	103,04
Cápsula nº	1	2	4	5	7
Peso da Cápsula + Solo Úmido(g)	16,82	15,5	19,17	19,97	20,45
Peso da Cápsula + Solo Seco(g)	15,42	14,08	17,04	17,23	17,07
Água(g)	1,4	1,42	2,13	2,74	3,38
Peso da Cápsula(g)	8,4	7,41	8,52	8,01	8,06
Solo Seco	7,02	6,67	8,52	9,22	9,01
Umidade (%)	19,94	21,29	25,00	29,72	37,51
Peso Específico Seco	1,148272	1,275919	1,4544	1,397641	1,212788