

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
LUANA CRISTINA DA SILVA OLIVEIRA

**ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS: ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA
RESISTÊNCIA MECÂNICA DE SOLOS POR INTERMÉDIO DA ADIÇÃO DE
ESTABILIZANTE LÍQUIDO INDUSTRIAL**

FORMIGA - MG
2018

LUANA CRISTINA DA SILVA OLIVEIRA

ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS: ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA
RESISTÊNCIA MECÂNICA DE SOLOS POR INTERMÉDIO DA ADIÇÃO DE
ESTABILIZANTE LÍQUIDO INDUSTRIAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil do UNIFOR-MG,
como requisito parcial para obtenção do título
de bacharel em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Dr. Tiago de Moraes Faria
Novais

FORMIGA – MG

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca UNIFOR-MG

O48 Oliveira, Luana Cristina da Silva.
Estabilização química de solos: análise da variação da resistência mecânica de solos por intermédio da adição de estabilizante líquido industrial / Luana Cristina da Silva Oliveira. – 2018.
69 f.

Orientador: Tiago de Moraes Faria Novais.
Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)-Centro Universitário de Formiga-UNIFOR, Formiga, 2018.

1. Estabilização dos solos. 2. Melhoramento do solo. 3. Resistência dos solos. I. Título.

CDD 631.433

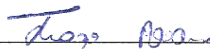
Catálogo elaborado na fonte pela bibliotecária
Rosana Guimarães Silva – CRB 6-3064

Luana Cristina da Silva Oliveira

ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS: ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA
RESISTÊNCIA MECÂNICA DE SOLOS POR INTERMÉDIO DA ADIÇÃO DE
ESTABILIZANTE LÍQUIDO INDUSTRIAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil do UNIFOR-MG,
como requisito parcial para obtenção do título
de bacharel em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Dr. Tiago de Moraes Faria
Novais

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Tiago de Moraes Faria Novais

Orientador


Prof. Dr. Paulo José Silva

UNIFOR – MG



Tiago da Silva Vieira

Engenheiro Civil

Formiga, 7 de novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos.” Pr. 16:3, por isso agradeço primeiro a Deus, pela força na realização deste trabalho. Que sua luz seja sempre minha guia, minha proteção, pois é nele em que me apoio, nos momentos de dificuldade.

A minha família, pelo incentivo, amor, confiança durante toda minha graduação e colaboração nos ensaios laboratoriais.

Agradeço de maneira especial ao meu orientador Prof. Dr. Tiago de Moraes Faria Novais, pelo voto de confiança, paciência em orientar, pelo suporte na realização dos ensaios laboratoriais e principalmente pela dedicação em transmitir seu conhecimento e ser minha inspiração profissional.

Aos professores do curso de Engenharia Civil, sobretudo ao Prof. Dr. Paulo José Silva e Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi, pelos ensinamentos e orientações durante a realização deste trabalho.

A todos profissionais do UNIFOR-MG, especialmente as bibliotecárias Maria Aparecida e Regina pelas instruções oferecidas.

RESUMO

O estabilizante químico de solos é um material líquido derivado de resinas e óleos vegetais que, segundo seu fabricante aumenta o CBR e reduz a expansão dos solos. Entretanto, em virtude da ampla recomendação do mesmo, estudou-se por intermédio de ensaios de caracterização, ensaio de compressão simples e análise comparativa de custo, a variação de resistência mecânica dos solos via líquida. Visando quantificar a variação de resistência mecânica desempenhada por solos com acréscimo de estabilizante líquido, avaliou-se nesta pesquisa o comportamento de dois solos distintos, sendo que, um foi classificado através do sistema H.R.B. como A2-7, e segundo o sistema U.S.C. como um SC, no qual foi adicionado 3% de cimento e estabilizante líquido de solos nos teores de 1:2500, 1:2000 e 1:1500. De maneira análoga, o segundo solo foi classificado por meio do sistema H.R.B. como um A7-6, e mediante do sistema U.S.C. como um CL, onde foram incorporados 3% de cal e estabilizante industrial nos teores de 1:2500, 1:2000 e 1:1500. Os resultados obtidos no programa experimental indicaram que a adição do estabilizante líquido aumenta a resistência mecânica dos solos, entretanto não atinge o índice de 2,1 MPa desejados, perfazendo um solo melhorado e não estabilizado. Além de mostrar que, para desenvolvimento de resistência mecânica o custo unitário apresenta-se relativamente maior que as técnicas já difundidas.

Palavras-chave: Estabilização dos solos. Melhoramento do solo. Resistência dos solos.

ABSTRACT

The chemical soil stabilizer is a liquid material derived from resins and vegetable oils which, according to its manufacturer, increases CBR and reduces soil expansion. However, due to its wide recommendation, the characterization tests, simple compression test and comparative cost analysis, the variation of mechanical resistance of the soils via liquid was studied. In order to quantify the variation of mechanical resistance performed by soils with addition of liquid stabilizer, the behavior of two different soils was evaluated in this study, one of which was classified through the H.R.B. system. as A2-7, and according to the U.S.C. system as an SC, in which 3% cement and liquid soil stabilizer in the amounts of 1: 2500, 1: 2000 and 1: 1500 were added. Similarly, the second soil was classified by the system H.R.B. as an A7-6, and by the U.S.C. system as a CL, where 3% lime and industrial stabilizer were incorporated in the contents of 1: 2500, 1: 2000 and 1: 1500. The results obtained in the experimental program indicated that the addition of the liquid stabilizer increases the mechanical strength of the soils, but does not reach the desired 2.1 MPa index, resulting in an improved and unstabilized soil. In addition to showing that, for the development of mechanical resistance, the unit cost is relatively higher than the already widespread techniques.

Keywords: Soil stabilization. Soil improvement. Soil resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formas de ocorrência da coesão aparente (a); e flocculação ou coesão verdadeira em solos argilosos (b).....	20
Figura 2 – Classificação quanto a distribuição dos grãos.....	22
Figura 3 – Diagrama esquemático de métodos de estabilização de solos	34
Figura 4 – Fluxograma do programa experimental	47
Figura 5 – Execução do peneiramento fino	48
Figura 6 – Determinação do limite de liquidez	49
Figura 7 – Determinação do limite de plasticidade	50
Figura 8 – Equipamentos Proctor Intermediário	52
Figura 9 – Solução de estabilizante líquido industrial.....	53
Figura 10 – Corpo de prova cilíndrico	53
Figura 11 – Determinação da umidade.....	54
Figura 12 – Ruptura dos corpos de prova em máquina universal de ensaios.....	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Exemplos de curvas granulométricas	22
Gráfico 2 – Esquema de classificação pelo Sistema Unificado.....	24
Gráfico 3 – Carta de plasticidade	26
Gráfico 4 – Critério de ruptura de Morh-Coulomb	30
Gráfico 5 – Granulometria adequada para estabilização solo-cimento	36
Gráfico 6 – Curva Granulométrica solo 1	57
Gráfico 7 – Curva granulométrica do solo 2	58
Gráfico 8 – Resistência à compressão simples do solo arenoso.....	60
Gráfico 9 – Resistência à compressão simples no solo argiloso	60
Gráfico 10 – Comparação da resistência desenvolvida pelo solo arenoso	61
Gráfico 11 – Comparação da resistência desenvolvida pelo solo argiloso.....	61
Gráfico 12 – Análise comparativa de custo.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Esquema para a classificação pelo Sistema Rodoviário	28
Quadro 2 – Escolha do agente estabilizador em função do tipo de solo	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Terminologia do Sistema Unificado.....	23
Tabela 2 – Teor de cimento sugerido para estabilização.....	37
Tabela 3 – Percentual de cal necessário para melhorar e estabilizar solos.....	38
Tabela 4 – Composição química do cimento utilizado.....	45
Tabela 5 – Composição química da cal utilizada	46
Tabela 6 – Composição de custos referência.....	55
Tabela 7 – Custo unitário	56
Tabela 8 – Teores de estabilizante químico.....	56
Tabela 9 – Composição Granulométrica solo 1.....	57
Tabela 10 – Composição Granulométrica solo 2.....	58
Tabela 11 – Limites de consistência.....	58
Tabela 12 – Classificação dos solos	59
Tabela 13 – Resistência à compressão simples	60
Tabela 14 – Custo Unitário.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAN	Cimento asfáltico natural
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EPI	Equipamento de proteção individual
H.R.B.	<i>Highway Research Board</i>
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
T.R.B.	<i>Transportation Research Board</i>
U.S.C.	<i>Unified Classification System</i>
γ_s	Peso específico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	JUSTIFICATIVA	17
4	REFERENCIAL TEÓRICO	18
4.1	Solo	18
4.2	Solos coesivos	19
4.3	Solos não coesivos	20
4.4	Granulometria	21
4.5	Classificação dos solos	23
4.5.1	Sistema Unificado de Classificação	23
4.5.1.1	Solos granulares	25
4.5.1.2	Solos finos	25
4.5.2	Sistema de classificação HRB/TRB	26
4.6	Resistência ao cisalhamento do solo	29
4.7	Estabilização de solos	30
4.7.1	Permeabilidade	31
4.7.2	Controle da expansibilidade	32
4.7.3	Acréscimo da resistência	32
4.7.4	Durabilidade	33
4.8	Métodos convencionais de estabilização de solos	33
4.8.1	Estabilização química	34
4.8.1.1	Estabilização de solos com cimento	35
4.8.1.2	Estabilização de solos com cal	37
4.8.1.3	Estabilização de solos com betume	39
4.8.2	Estabilização mecânica	40
4.8.2.1	Compactação	41
4.9	Estabilizante líquido industrial	42
5	MATERIAIS E MÉTODOS	45
5.1	Classificação dos solos	48
5.2	Diretrizes para execução do programa experimental	50

5.3	Ensaio de resistência à compressão simples	51
5.4	Análise comparativa de custo	55
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
6.1	Ensaio de classificação dos solos	57
6.2	Ensaio de resistência à compressão simples	59
6.3	Análise comparativa de custo	63
7	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Visando melhorar o desenvolvimento dos serviços de infraestrutura, é de suma importância técnicas construtivas que, além de melhorar a eficiência das obras, garantam economia na execução e baixos impactos ambientais. Em diversas obras geotécnicas, os solos em seu estado original, não apresentam os requisitos necessários para desempenhar adequadamente as condições impostas em um projeto, seja como material de construção civil ou elemento de suporte. Desta forma, uma das alternativas possíveis, é a estabilização dos solos, de modo a melhorar o desempenho das propriedades físicas e mecânicas apresentadas pelo mesmo.

A estabilização de solos é um mecanismo que pode ocorrer basicamente por três processos. A estabilização mecânica, que visa arrumar as partículas de solo ou a correção granulométrica; a estabilização física, onde as alterações das partículas de solos são realizadas por processo de aplicação de calor ou potencial elétrico; e a estabilização química, que procura modificar o comportamento dos solos pela inserção de um aditivo ao mesmo (CRUZ; JALALI, 2003).

As técnicas de melhoramento de solos já eram utilizadas há mais de 3000 anos na construção dos templos na antiga Babilônia. Neste tempo eram utilizadas madeiras, bambus ou palhas como reforço para solos. Já os primeiros vestígios da aplicação da estabilização em construções de pavimentos rodoviários aludem a época das civilizações Mesopotâmica e Romana. Entretanto, o processo de estabilização em grande proporção só teve início após a Segunda Guerra Mundial, considerando o crescimento da demanda por aeroportos e vias de acesso mais resistentes às cargas (CRISTELO, 2001).

Obras rodoviárias estão sujeitas a grandes variações de materiais dentro de um mesmo projeto. Neste caso, a estabilização de solos pela inserção de um aditivo ao mesmo, torna-se uma alternativa interessante, que pode viabilizar o empreendimento. Dentre os aditivos químicos mais utilizados na pavimentação, destacam-se o uso do cimento Portland e a cal hidratada.

A utilização do cimento Portland como estabilizante de solos é uma técnica normatizada, que pretende realizar melhorias nas propriedades dos solos de maneira durável. Seja para modificar a plasticidade e o comportamento do solo em contato com a água, como para adquirir características cimentantes suficientes para aumentar a capacidade de suporte do material. A estabilização química com o emprego de cal hidratada ao solo é realizada por mecanismos de troca de íons, floculação, reações pozolânicas e a carbonatação. Onde,

dependendo da constituição química e mineralógica, a granulometria das partículas, o tipo e teor de cal empregada, resultam em acréscimos de resistência, bem como melhorias na trabalhabilidade, plasticidade e expansibilidade.

Partindo desse pressuposto, este trabalho se propõe a analisar a variação de resistência mecânica de solos utilizando o cimento Portland e a cal hidratada, que são técnicas já difundidas no que tange a estabilização de solos de forma química, com o acréscimo de estabilizante líquido industrial, visando avaliar sua aplicabilidade no desenvolvimento desta característica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a variação de resistência mecânica de solos quando submetidos a adição de estabilizante químico líquido reagindo com cal hidratada e cimento.

2.2 Objetivos Específicos

Esta pesquisa também possui, como objetivos específicos, os seguintes itens:

- Realizar a classificação dos solos a serem estabilizados pelo sistema de classificação de solos para pavimentação H.R.B. e pelo Sistema Unificado de Classificação – U.S.C., além de verificar a resistência das amostras de solo original;
- Avaliar a variação da resistência mecânica dos solos, quando submetidos a adição do estabilizante líquido industrial e seus reagentes;
- Analisar a efetividade do uso do estabilizante líquido industrial combinado com cal hidratada e cimento.

3 JUSTIFICATIVA

A necessidade de técnicas de estabilização de solos sejam elas de forma física, química ou mecânica; objetivam a correção na deficiência das propriedades que garantem estabilidade e resistência mecânica ao solo, para que os mesmos suportem as cargas e esforços oriundos de construções nele apoiadas. Muitas vezes a substituição ou remoção do material de origem, por material com características satisfatórias, pode significar grande movimentação de material. Isto induzirá a elevados custos operacionais e atraso na execução da obra ou, em último caso, a adequação no dimensionamento do projeto, obedecendo às restrições impostas ao solo original, que podem inviabilizar um negócio.

A escolha por uma técnica de estabilização que resulte em baixo custo, fácil execução e baixo impacto ambiental é definida principalmente pelo custo total, cronograma, utilidade da obra e as propriedades do solo que necessitem de correção.

Neste trabalho foi analisada a estabilização de solos de forma química, com a realização de ensaios laboratoriais com estabilizante líquido industrial, potencializado com o reagente cal hidratada, em um solo argiloso e cimento em um solo arenoso. Com intuito de verificar a eficiência dos produtos usados de modo combinado no desenvolvimento dos resultados de variação de resistência mecânica dos solos com adição química.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Solo

O uso de solos como elemento de suporte ou material de construção em projetos de engenharia civil, torna imprescindível o conhecimento de suas propriedades e a consideração do seu comportamento quando tensões são aplicadas ou aliviadas. Segundo Craig (2004) solo é qualquer aglomeração de partículas minerais soltas, ou fracamente unidas, com espaços vazios ocupados por água e/ou ar.

Os solos são resultantes de intemperismos por desintegração mecânica, através da atuação da água, temperatura, vegetação e vento; ou por decomposição química, que tem como principal agente a água e seus mecanismos de ataque como a oxidação, hidratação e carbonatação. Formando os pedregulhos, areias, siltes e por último as argilas (CAPUTO, 1988). Se após a formação, os solos permanecem próximos à rocha de origem, são denominados residuais; ou podem ser transportados por agentes como água, vento, gravidade ou geleiras; modificando a forma e dimensões dos mesmos, formando solos sedimentares. As partículas encontradas no solo apresentam a mesma composição mineralógica da rocha original (AZEVEDO, 2010).

Segundo Caputo (1998) os solos grossos são compostos por silicatos, óxidos, carbonatos e sulfatos, destacando-se os feldspatos, micas e quartzo que são silicatos encontrados na maioria das rochas. Já os solos finos, são constituídos de pequenos minerais cristalinos, divididos em três grupos principais, que reagem de forma diferente em contato com a água. As caolinitas, que são estáveis na presença da água; as montmorilonitas que são muito expansivas, portanto, instáveis na presença de água; e as ilitas que apresentam estrutura similar as montmorilonitas, porém são menos expansivas.

Para Das (2007), a estrutura de um solo é definida pelo agrupamento e distribuição das partículas, umas em relação as outras. Dentre os fatores que afetam a organização das partículas estão a forma, tamanho, formação mineralógica, natureza e composição de água no solo. Convencionalmente, estruturas granulares possuem forma de esfera ou faces arredondadas; blocos angulares e/ou subangular possuem formato cuboide; laminares possuem faces de aspecto plano e as dimensões horizontais excedem as verticais; prismáticas são análogas as laminares, mas as dimensões verticais excedem as horizontais; e colunar que também possui formato alongado verticalmente, mas com acabamento superior arredondado (LEPSCH, 2010).

4.2 Solos coesivos

Solos coesivos, ou seja, solos que possuem parcela de resistência ao cisalhamento, causada pela atração físico-química entre as partículas ou pela cimentação existente entre as mesmas. Independente das tensões aplicadas é capaz de manter as partículas unidas em forma de torrões ou blocos, podendo ser cortado em formas diversas e manter essa forma. Os solos que apresentam propriedades coesivas são tradicionalmente constituídos de minerais argilosos, que apresentam estrutura lamelar. Ou seja, existe preponderância de duas dimensões sobre a terceira, além de possuir ligações entre as partículas, tornando-as próximas umas das outras em função potencial atrativo coloidal (VARGAS, 1977).

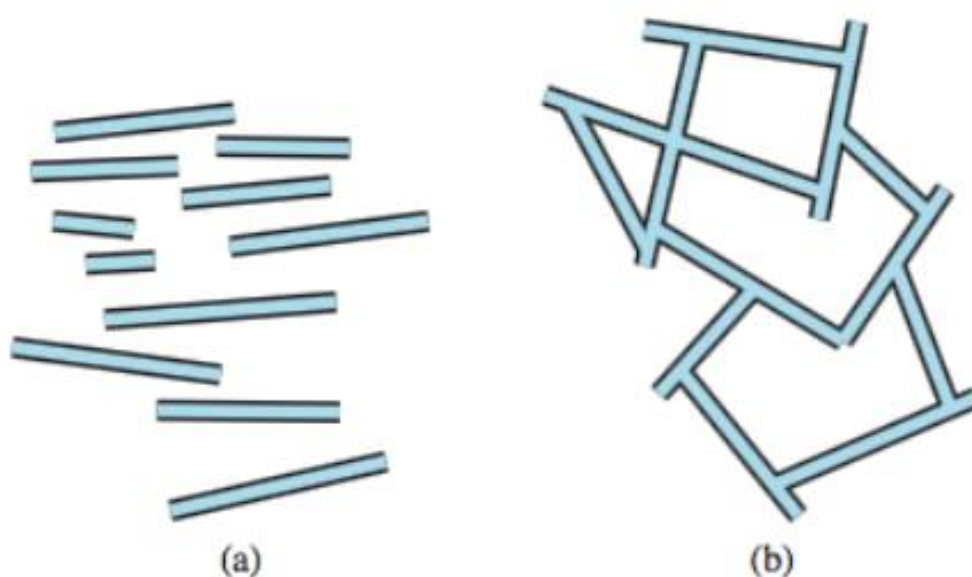
A superfície específica dos solos coesivos é considerada elevada, pois verifica-se interferência significativa das cargas elétricas no comportamento mecânico deste tipo de solo. Principalmente sobre as forças de massa, além da influência das tensões capilares e tensões entre grãos. A utilização deste tipo de solo na compactação de aterros é realizada em grande escala, uma vez que, ele apresenta resistência ao cisalhamento adicional, quando comparados aos solos não coesivos (CRISPIM, 2007).

As argilas são formadas em sua maioria por argilominerais, bem como, por matéria orgânica, quartzo, mica, pirita e calcita, que possuem em sua composição morfológica plaquetas de lamina muito finas, compostas principalmente de alumínio, silício, magnésio, potássio, oxigênio e hidrogênio. Este tipo de coloide é termodinamicamente instável e está sujeito a coagulação, ou seja, ele repele parte de água que não é absorvida pelo mesmo (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Considerando que, quantidades de argila sejam dispersas na água, inicialmente ocorrerá o processo chamado de “coesão aparente”, que segundo a ABNT NBR 6502 (ABNT, 1995) é definida como tensão capilar apresentada pela água que provoca atração das partículas, na qual desencadeia a repulsão entre as partículas de solo. Isto ocorre devido às cargas superficiais negativas apresentadas pelos coloides, que em contato com a água atraem os íons positivos na interface sólido-líquido formando uma camada compacta. Quando íons negativos se aproximam da carga compacta, atraem os íons positivos formando uma camada difusa que envolve a primeira. Uma vez que, dois coloides análogos se aproximam, ocorre a interação entre as camadas difusas dos mesmos. Provocando repulsão devido as forças eletrostáticas onde as mesmas podem permanecer em suspensão ou sedimentar lentamente. Entretanto, existem forças atrativas entre as partículas, denominadas forças de van der Waals, que ocorrem através da interação dipolo-dipolo, dipolo-dipolo induzido e de dispersão. Assim, quando existe uma

energia mínima primária e pequena distância entre as partículas, a força atrativa entre as partículas supera a repulsiva, então, finalmente ocorre a aglomeração irreversível entre elas conhecida como floculação ou “coesão verdadeira” (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Um esquema ilustrativo destas duas formas de coesão que podem ocorrer em solo argiloso podem ser vistos na FIG. 1.

Figura 1 – Formas de ocorrência da coesão aparente (a); e floculação ou coesão verdadeira em solos argilosos (b)



Fonte: DAS, 2007, p. 65.

4.3 Solos não coesivos

Normalmente as estruturas encontradas em solos não coesivos são diferentes da forma lamelar dos solos coesivos, a relação superfície-volume é menor, tornando os fenômenos de superfícies pouco relevantes. Os arranjos geométricos comumente encontrados são os isolados ou alveolares (CRISPIM, 2007).

Para Das (2007), estruturas com grãos isolados apresentam partículas com posições estáveis, umas em relação as outras, influenciando diretamente na densidade do agrupamento. Desta forma, o índice de vazios entre as partículas é alto. O acondicionamento de partículas menores entre as maiores, visto que solos não possuem partículas iguais, nem esféricas; sugere a ocorrência de aproximação das mesmas. Entretanto, a irregularidade da forma das partículas geralmente produz o mesmo intervalo de vazios que considerar as partículas como esferas iguais. Já nas estruturas alveolares, compostas por areias e siltes relativamente finos; formam

pequenos arcos com correntes de partículas, apresentando grandes índices de vazios, que quando submetidos à carga elevada ou carregamento de choque, rompem a estrutura gerando recalque expressivo.

4.4 Granulometria

Todos os solos são compostos por partículas sólidas com proporções e tamanhos variados. Diante da determinação do tamanho e ocorrência das partículas, é possível obter uma função de distribuição granulométrica no solo (NOGUEIRA,1988).

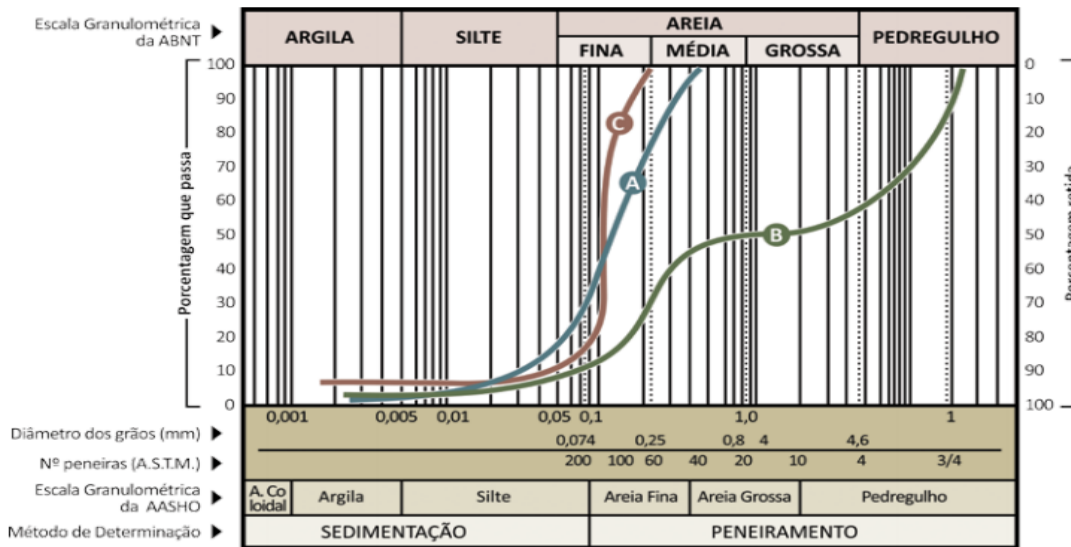
Para determinação do tamanho dos grãos são necessários dois ensaios: peneiramento e sedimentação, conforme descrito na ABNT NBR 7181 (ABNT, 2017). O ensaio de peneiramento consiste em agitar uma amostra de solo seco, por um conjunto de peneiras que possuam aberturas sucessivamente menores, onde, somando-se os pesos das amostras retidas em cada peneira, é possível calcular a porcentagem que passa em cada peneira, e determinar tamanhos de partículas maiores que 0,075 mm de diâmetro. Para determinação dos solos finos, isto é, que possuem partículas menores que 0,075 mm é necessário o ensaio de sedimentação dos grãos do solo em água. Baseando-se na lei de Stokes, onde o peso específico e a velocidade de queda das partículas em um fluido de viscosidade e peso específico conhecidos. É possível determinar através de leituras de dessimétricas em intervalos de tempo o diâmetro equivalente das partículas.

Segundo a ABNT NBR 6502 (ABNT, 1995), as partículas de solo podem ser classificadas na seguinte escala granulométrica:

- Pedregulho: Formado por partículas com diâmetro equivalente compreendidos entre 2,00 mm e 60,00 mm; que quando encontrados em formatos arredondados ou semi-arredondados, são denominados cascalhos ou seixos.
- Areia: É constituída de partículas com diâmetros entre 0,6 mm e 2,00 mm, apresentando características não coesivas e não plásticas.
- Silte: É formado por partículas compreendidas entre 0,002 mm e 0,06 mm, que exibem baixa ou nenhuma plasticidade e baixa resistência quando seco ao ar.
- Argila: Solo constituído por dimensões de partículas inferiores a 0,002 mm, apresentando características coesivas e plásticas.

Como forma de exemplificar as faixas granulométricas existentes, são apresentados três curvas granulométricas no GRAF. 1.

Gráfico 1 – Exemplos de curvas granulométricas



Fonte: Souza (2015)

Marcando pontos em um diagrama semi-logarítmico, em que as ordenadas representam a porcentagem que passa ou fica retida, e no eixo das abcissas as dimensões das partículas, é possível obter uma curva granulométrica que pode ser de forma contínua (curva A). Ou seja, possui várias dimensões de grãos, portanto uma curva bem graduada; descontínua (curva B), isto é, possui insuficiência de material fino preenchendo as partículas maiores. Portanto, mal graduada e uniforme (curva C), possui a mesma graduação de partículas (SOUZA, 2015). Um esquema ilustrativo das formas de distribuição dos grãos de solos pode ser visto na FIG. 2.

Figura 2 – Classificação quanto a distribuição dos grãos

SOLO UNIFORME

Todos os grãos com diâmetros próximos



SOLO UNIFORME

SOLO BEM GRADUADO

Grãos uniformemente distribuídos



SOLO MAL-GRADUADO

Granulometria aberta



Fonte: SOUZA, 2015, p. 18.

4.5 Classificação dos solos

A variação do comportamento dos solos diante aos interesses de engenharia, levou a elaboração de sistemas de classificações que permitam conhecimento das suas propriedades e a padronização da linguagem na descrição dos solos. Perante esta classificação, o responsável técnico por uma obra, poderá no desenvolvimento do seu projeto, analisar soluções, processos construtivos, determinar custos e viabilidade técnica e econômica de um empreendimento.

Existem diversas formas de se classificar solos, tal como o tamanho das partículas, origem, plasticidade, estrutura ou pela presença de matéria orgânica. A identificação dos solos pode ser definida tanto por ensaios de laboratório, como por procedimentos visuais e manuais simples que descrevem a cor, formato, textura e odor (CRAIG, 2004). Para Caputo (1988), os principais sistemas de classificações empregados mundialmente são: o Sistema Unificado de Classificação (*Unified Classification System – U.S.C.*) e a Classificação do H.R.B. (*Highway Research Board*), que é comumente empregado na engenharia rodoviária.

4.5.1 Sistema Unificado de Classificação

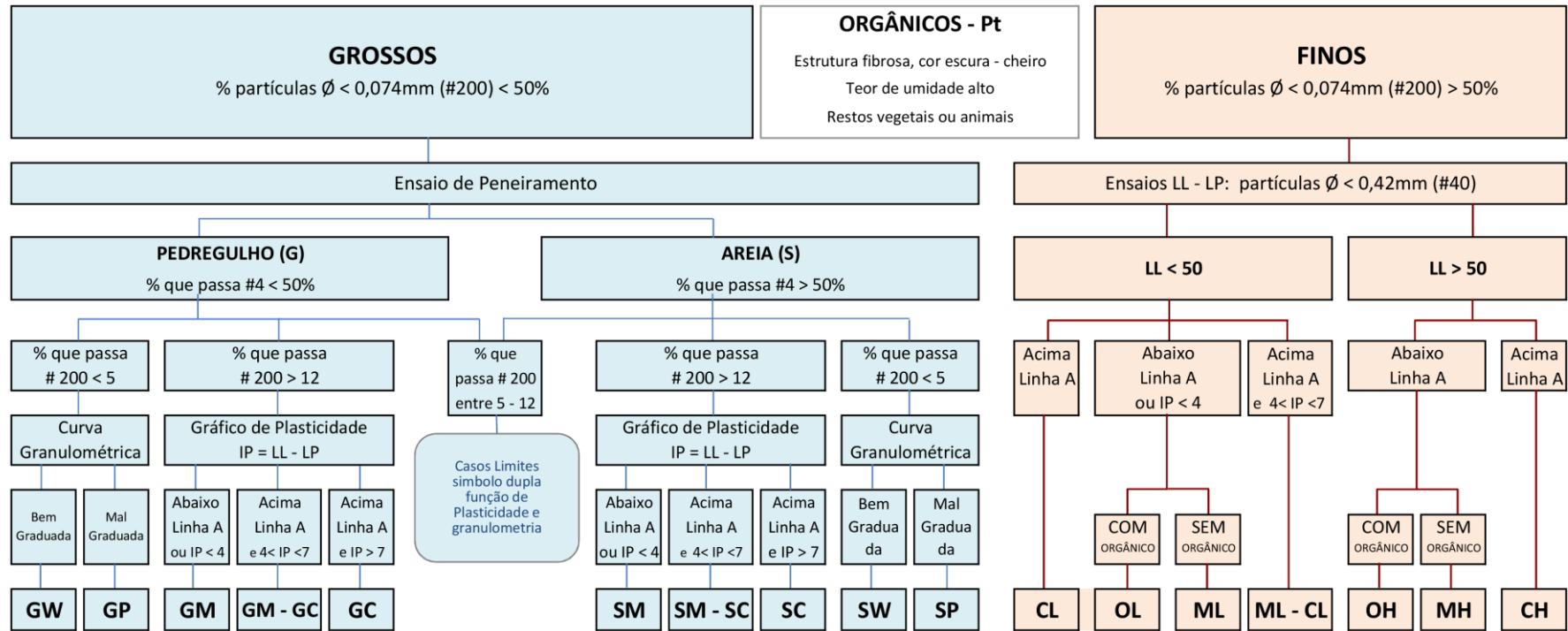
Este sistema classifica a fração grossa, sobretudo por parâmetros granulométricos, enquanto que, em solos finos é utilizado índices de consistência. Os solos orgânicos são caracterizados como um grupo individual e de comportamento próprio (NOGUEIRA, 1988). Neste sistema, os solos são identificados por duas letras, que correspondem ao tipo principal e informações complementares, como apresentado na TAB. 1, e no esquema utilizado para classificação pelo Sistema Unificado (GRAF. 2).

Tabela 1 – Terminologia do Sistema Unificado

Terminologia	Classificação
G	Pedregulho
S	Areia
M	Silte
C	Argila
O	Solo orgânico
W	Bem graduado
P	Mal graduado
L	Alta compressibilidade
H	Baixa Compressibilidade
Pt	Turfas

Fonte: Pinto (2006)

Gráfico 2 – Esquema de classificação pelo Sistema Unificado



Fonte: UDESC (2017)

4.5.1.1 Solos granulares

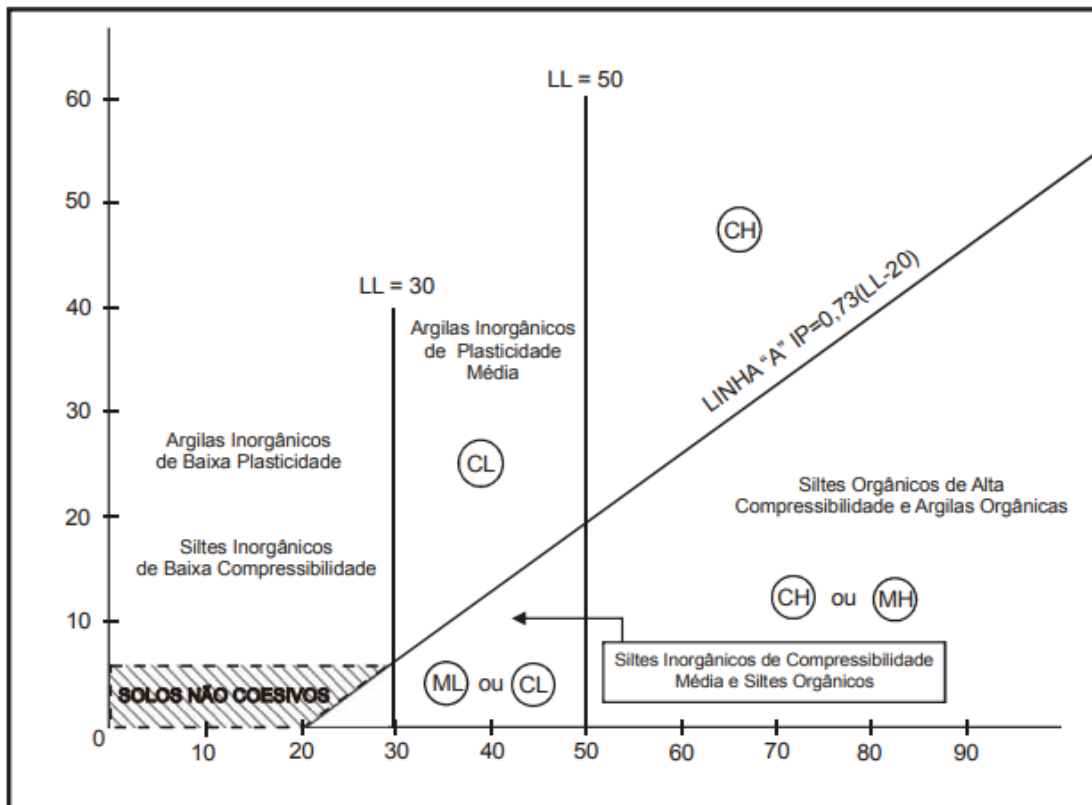
Solos com graduação grosseira são convencionalmente classificados como aqueles que tenham porcentagem inferior a 50 de material fino que passa na peneira nº 200 (0,075 mm). Subdividem-se solos grossos em pedregulhos, quando mais que 50% fica retida na peneira nº 4 (4,8 mm) e areias, quando porcentagem maior ou igual a 50% dessas partículas, tem tamanho inferior a 4,8 mm (NOGUEIRA, 1988). Entretanto para Pinto (2006), se o material tiver menos que 5% passando pela peneira nº 200, é necessário analisar sua característica secundária. Classificando-os em “bem graduado” e “mal graduado”, pois partículas menores entre as maiores criam entrosamento, garantindo menor compressibilidade e maior resistência. Sempre que a granulação grosseira apresentar de 5 a 12% de finos, o solo será apresentado em símbolo duplo, tendo classificações intermediárias, como por exemplo, SP-SC, areia mal graduada, argilosa. Já quando a porcentagem de finos ultrapassa 12, a uniformidade da granulometria é desprezada, considerando somente as propriedades desse solos finos.

4.5.1.2 Solos finos

Quando a fração fina do solo tem porcentagem maior ou igual a 50 passando na peneira nº 200, ele poderá ser classificado como siltoso. Isto é, aquele onde é possível desagregar os torrões com os dedos; argiloso, aquele que exibem dificuldade em se quebrar os torrões com os dedos; ou solo orgânico e turfa, ou seja, aqueles compostos por matéria orgânica em decomposição, que geralmente garante cor preta, ou textura fibrosa (VARGAS, 1977).

Porém, esta separação, não é feita baseada nas porcentagens das frações granulométricas, são os índices de consistência quem distinguem a melhor classificação. Introduzindo pontos correspondentes a valores de limites de liquidez (LL) e índices de plasticidade (IP) na Carta de Plasticidade, são encontrados acima da linha A, solos argilosos. Os solos siltosos e orgânicos de qualquer tipo estão representados abaixo da linha A. Outra característica a ser analisada é a compressibilidade, que aumenta conforme o limite de liquidez (LL) apresentado pelos solos. Assim, todos os LL superiores a 50 apresentam alta compressibilidade e os inferiores a 50 baixa compressibilidade, como mostrado na carta de plasticidade do GRAF. 3 (PINTO,2006).

Gráfico 3 – Carta de plasticidade



Fonte: DNIT(2006)

4.5.2 Sistema de classificação HRB/TRB

Sistema muito aplicado na engenharia rodoviária, também classifica solos baseando-se em granulometria e limites de Atterberg. Os solos que possuem menos que 35% passando pela peneira nº 200 são materiais granulares e classificados sob os grupos A-1, A-2 e A-3. Já os solos com mais de 35% das partículas passando pela peneira nº 200, que geralmente são siltes e argilas, constituem os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7, são distinguidos em função do limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) apresentados pelos solos, conforme classificação apresentada no QUADRO 1 (DAS, 2007).

Para determinar a capacidade de suporte de um solo como material de fundação de um pavimento é utilizado um número nomeado índice de grupo (IG). Conforme apresentado na Equação 1, apoiando-se nos limites de Atterberg, que são compreendidos entre 0, que representam excelentes solos para engenharia rodoviária, a 20, que são materiais que devem ser evitados. Comumente, solos granulares possuem índice de grupo variando de 0 a 4, siltosos entre 1 a 12 e argilosos de 1 a 20 (CAPUTO, 1988).

$$IG = 0,2 a + 0,005 ac + 0,01 bd \quad (1)$$

onde:

a = porcentagem de partículas que passa na peneira nº 200, menos 35; se resultado >75, adota-se 40; se < 35, adota-se 0.

b = porcentagem de partículas que passa na peneira nº 200, menos 15; se resultado > 55, adota-se 40; se < 15, adota-se 0.

c = número do limite de liquidez, menos 40; se resultado > 60%, adota-se 20%; se < 40%, adota-se 0.

d = número do limite de plasticidade, menos 10; se resultado > 30%, adota-se 20%; se < 10%, adota-se 0.

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

Quadro 1 – Esquema para a classificação pelo Sistema Rodoviário

Solos Granulares – Porcentagem que passam na peneira Nº 200 < 35%								Solos Finos – Porcentagem que passam na peneira Nº 200 > 35%				
Grupo	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7	
% que passam na # Nº 10 Nº 40 Nº 200	A1a	A1b	51 min. 10 máx.	A2-4	A2-5	A2-6	A2-7	36 min.	36 min.	36 min.	A7-5	A7-6
	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.		35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.				36 min.	36 min.
A fração que passa na # 40 deve ter: LL IP	6 máx.		NP	40 máx. 10 máx.	41 min. 10 máx.	40 máx. 10 min.	41 min. 11 min.	40 máx. 10 máx.	41 min. 10 máx.	40 máx. 11 min.	41 min. (LL – 30) máx.	41 min. (LL – 30) min.
IG	0		0	0		4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.	
Composição do solo	Solo constituído de uma mistura bem graduada de pedra, pedregulho, areia grossa, média e fina e um material ligante não plástico ou de pequena plasticidade.		Areia fina de praia ou então de deserto sem ligante (argila ou silte) ou então pequena quantidade de silte sem plasticidade.	São solos que contém grande variedade de materiais granulares, os quais estão no limite entre os solos do grupo A1 e A3 e materiais silte-argilosos do grupo A4, A5, A6 e A7.				Os solos do grupo A4 têm como material típico silte não plástico ou moderadamente plástico, tendo em geral 75% que passam na peneira 200, podem conter também uma mistura de silte e 64% de areia e pedregulho. Os solos do grupo A5 contém materiais semelhante ao do grupo A4, sendo porém diatomáceos ou micáceos, têm elevado LL, sendo portanto, altamente elásticos.	O solo típico desse grupo é a argila, tendo 75% ou mais que passa na peneira 200. Contém também mistura de solo argiloso e 61% de areia e pedregulho. Tem alta variação de volume entre seu estado úmido e seco.	Os solos desse grupo contém material semelhante ao descrito no grupo A6, tendo porém alto LL, que é característico do grupo A5, sendo plástico e sofrendo grande mudança de volume.		
	Predomina pedra e pedregulho com ligante sem areia fina.	Predomina areia média com ou sem ligante, bem graduado.		Contém materiais granulares com 35% ou menos, que passam na # 200 e com uma parte mínima que passa na # 40, que têm as mesmas características dos materiais do grupo A4 e A5. Contém também pedregulho com percentagem de silte ou IP > que dos solos do grupo A1, e areia fina com silte não plástico com % acima do solo do grupo A3.	São semelhantes aos solos do grupo A2-4 e A2-5, a parte que passa na peneira 40 contém argila plástica, tendo as mesmas características dos solos do grupo A6 no caso do A2-6 ou A7 no caso do A2-7.	Contém todos os materiais com IP moderado em relação ao LL, podendo ser altamente elásticos e sofrerem grande variação de volume.	Contém materiais com alto valor de IP em relação ao LL, estando sujeitos a grandes variações de volume.					
Funcionamento como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre				

Fonte: ADAPTADO DNIT (2006)

4.6 Resistência ao cisalhamento do solo

Segundo Das (2007), para solucionar problemas com estabilização de solos em geral, é necessário, análise da resistência da massa de um solo. Ou seja, a resistência interna por área unitária que um solo oferece ao longo de qualquer plano sem se romper ou deslizar. A ruptura de um solo ocorrerá em qualquer ponto onde atue a combinação da tensão normal efetiva ($\sigma'f$) e de cisalhamento, e não da máxima tensão dos mesmos de forma isolada. Portanto, a função linear que melhor representa os critérios de resistência ao cisalhamento é dada pela Equação 2.

$$\tau_f = c' + \sigma' f \operatorname{tg} \phi' \quad (2)$$

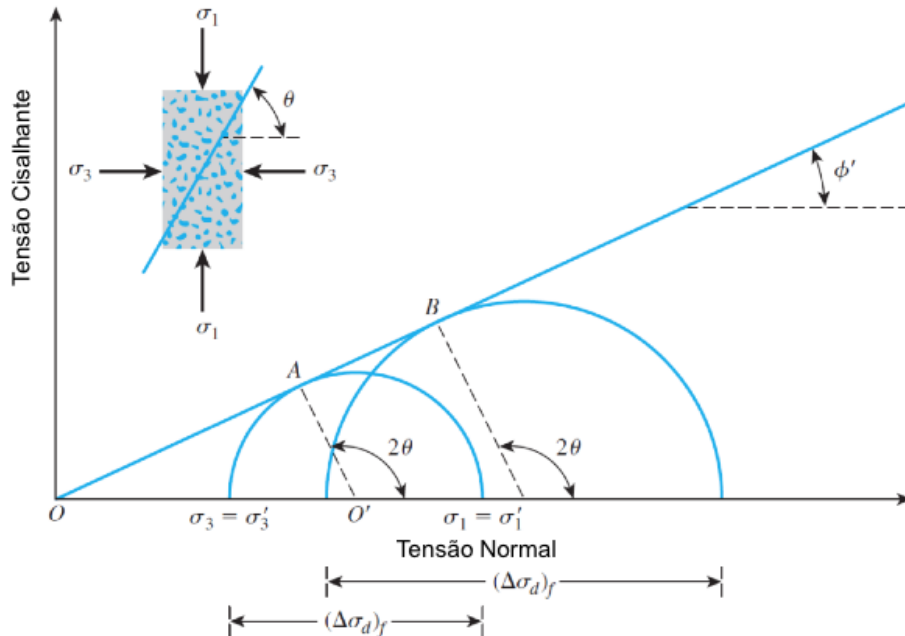
Em que o parâmetro de resistência ao cisalhamento ϕ' , corresponde ao ângulo de atrito interno entre os sólidos. Isto é, a força resistente quando se verifica tendências ao movimento por ações de forças externas aplicadas. Outro parâmetro que impede o movimento das partículas é a coesão (c') ou quantidade de cola entre as partículas do solo. Deste modo, quando a tensão superar a o efeito da força de atrito entre as partículas, a estrutura não se moverá, devido ao efeito de coesão existente entre as partículas. No entanto, a repetição de forças de deslocamento após a primeira falha apresentará comportamento diferente, pois anula-se o valor da coesão, bastando superar as forças de atrito para renovação do movimento (FIORI; CARMIGNANI, 2009).

Um plano de estado de tensões pode ser representado por um gráfico de tensão de cisalhamento (τ) em relação à tensão efetiva (σ), ou por um círculo de Morh estabelecido pelas tensões efetivas principais maior e menor. As linhas de reta ou ligeiramente curvas inseridas nos círculos de Morh, marcam o limite entre os estados estáveis e instáveis. Denominadas envoltória de ruptura, isto é, tensões situadas acima da envoltória de Morh atingem a ruptura (CRAIG, 2004).

Ainda segundo Craig (2004), nos casos em que a coesão é nula, a linha passa por um ponto de tensão e pela origem, quebrando a estrutura, devido os efeitos das tensões σ_1 e σ_3 , conforme os critérios de rupturas apresentados no GRAF. 4. Considerando as mesmas solicitações em um solo com $c > 0$, a estrutura não irá se romper, pois estará contida na área estável. As coordenadas do ponto de tangência, denominada critério de ruptura de Morh-Coulomb são simplificadaamente obtidas pela Equação 3.

$$\sigma_1 = \sigma_3 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (3)$$

Gráfico 4 – Critério de ruptura de Morh-Coulomb



Fonte: Blackboard (2018)

4.7 Estabilização de solos

No entendimento de Vargas (1977), o processo de estabilização de um solo confere a este, maior resistência às cargas e desgaste à erosão. Que, embora possam não ser a mais alta que o solo pode oferecer, sejam duráveis, independente das estações do ano e das condições climáticas, seja executada por meio de compactação, correção granulométrica e da plasticidade ou por adição de substâncias que proporcionem coesão por cimentação ou aglutinação dos seus grãos. A necessidade de melhoramento de solos por estabilização, visando aplicação na engenharia; deve-se, sobretudo, a fraca capacidade de carga, elevada permeabilidade, dificuldade de aplicação de outros métodos e ao fato de solos naturais serem pouco adequáveis a execução de fundações superficiais, principalmente estradas e aeroportos (CRISTELO, 2001).

A prática de estabilização de solos está profundamente ligada a construção de estradas, uma vez que, neste tipo de obra são encontrados maiores variações de solo dentro de uma mesma obra. Portanto, faz-se necessário, implantação de técnicas de estabilização a fim de reduzir o custo final da obra e torná-la resistente a ação de cargas exteriores e ações climáticas ao longo do tempo. Entretanto, a prática de estabilização deverá também ser considerada na

área de construção civil, uma vez que as técnicas de estabilização viabilizam projetos e reduzem custos com fundações (FERRAZ, 1994).

Segundo Cristelo (2001), estabilizar solos onde o estado de tensão é constante e existe pouca variação no teor de umidade, como em barragens e fundações profundas; diverge da estabilização de terrenos superficiais de uma encosta, onde, a dimensão da variação da umidade é considerável. Bem como, estabilizar pavimentos rodoviários, onde a amplitude de variação de tensões e umidade são significativas. Isto se deve ao fato da resistência adquirida pelo solo, que, além de variar com as características particulares do solo, são mutáveis também pelo estado de tensão introduzido anteriormente e com o teor de água. Uma vez que, solos expansivos podem perder sua resistência em contato com a água.

De maneira genérica a estabilização de solos visa alterar as características das propriedades naturais do solo contra medidas adversas, seja durante o período de execução, quanto ao tempo posterior a entrega da obra. Assim sendo, as propriedades observadas na escolha do método de estabilização são a permeabilidade, controle da expansibilidade, acréscimo de resistência e durabilidade da estabilização (GANDOLFI; CARDOSO, 2013).

4.7.1 Permeabilidade

No entendimento de Craig (2004), a permeabilidade de um solo é a propriedade que permite escoamento de água através dos poros existentes entre as partículas sólidas. Relaciona-se essa propriedade, sobretudo, ao tamanho médio dos poros, que está vinculado a distribuição do tamanho das partículas, a forma e a estrutura do solo. Normalmente, quanto menor a fração das partículas, menor será a fração média dos poros e o coeficiente de permeabilidade. Ou seja, o que determina a permeabilidade de um solo são os finos presentes, e não a predominância de um tamanho de grão. Geralmente, os pedregulhos e areias são razoavelmente permeáveis, divergindo das argilas, que apresentam comportamento pouco permeável. Ainda em função da granulometria, frequentemente solos mal graduados apresentam maior permeabilidade comparado a solos bem graduados (DNIT, 2006).

Segundo Pinto (2006), o coeficiente de permeabilidade sofre variação em virtude dos seguintes aspectos:

- **Estado do solos:** Quanto mais fofo, mais o solo será permeável.
- **Grau de saturação:** Em solos não saturados, existem bolhas de ar, que criam obstáculos ao fluxo de água, aumentando a permeabilidade do mesmo.

- **Estrutura e anisotropia:** A percolação da água depende também do arranjo dos grãos, e não exclusivamente da quantidade de vazios.
- **Temperatura:** O peso específico e a viscosidade do líquido, empregado no coeficiente de permeabilidade variam com a temperatura.

4.7.2 Controle da expansibilidade

A expansibilidade é a propriedade que advém da entrada de água nas interfaces das partículas argilosas, ou a isenção de pressões de sucção que o solo foi anteriormente exposto. O fenômeno da expansão pode ocorrer quando a impermeabilização do terreno ocasiona elevação do teor de umidade, sendo que, anteriormente ocorria evaporação da água por capilaridade. Outro fator que pode acarretar a expansão de solos, é a lixiviação das pressões, mesmo quando o solo se encontra saturado, absorvem a água do lençol freático e expande-se (PINTO, 2006). A expansibilidade influencia na permeabilidade do material, pois, solos com alto teor de expansibilidade não confinada, levará a formação de fissuras, elevando a permeabilidade do material (RIBEIRO, 2002).

Segundo Cristelo (2001), as soluções normalmente empregadas no controle da expansibilidade são:

- Rebaixamento do nível de água do lençol freático;
- Aplicação de sobrecargas temporárias para acelerar o endurecimento;
- Utilização de geomembranas;
- Fundações localizadas sob pouca variação do teor de umidade;
- Alteração nas propriedades para solo tipicamente granular;
- Retardar a entrada da água no solo.

4.7.3 Acréscimo da resistência

No entendimento de Senço (2001), entre as propriedades que um solo estabilizado deve apresentar, sobressaem-se sobre as demais a ampliação da resistência ao cisalhamento e resistência a deformações. Pois, os processos de estabilização devem dotar os solos de capacidade de resistência a ruptura durante todo o período em que os mesmos forem utilizados para determinada função.

O desenvolvimento da resistência de solos estabilizados depende das condições de estado de densidade e de umidade do solo. O arranjo e a aglutinação das partículas do solo, bem como, a quantidade de água de compactação e de equilíbrio, são medidas na determinação da deformabilidade de um solo (MEDINA; MOTTA, 2005). Além destes fatores, a presença de matéria orgânica superior a 1%, retardam as reações químicas, não respondendo ao processo de estabilização de forma adequada, portanto alcançando acréscimos de resistência insuficientes (PORTELINHA, 2008).

De forma geral, antes da escolha do melhor processo de estabilização, devem ser aferidas as frações de distribuição granulométrica apresentada pelo solo, pois desta forma, será possível determinar as variáveis presentes no ensaio de cisalhamento. Devem ser determinados na análise o aumento de resistência a coesão unitária (c), obtida pela porcentagem passando na peneira nº200, assim como o ângulo de atrito interno (ϕ), que é conferido pela porcentagem que fica retida na peneira nº 200 (SENÇO, 2001).

4.7.4 Durabilidade

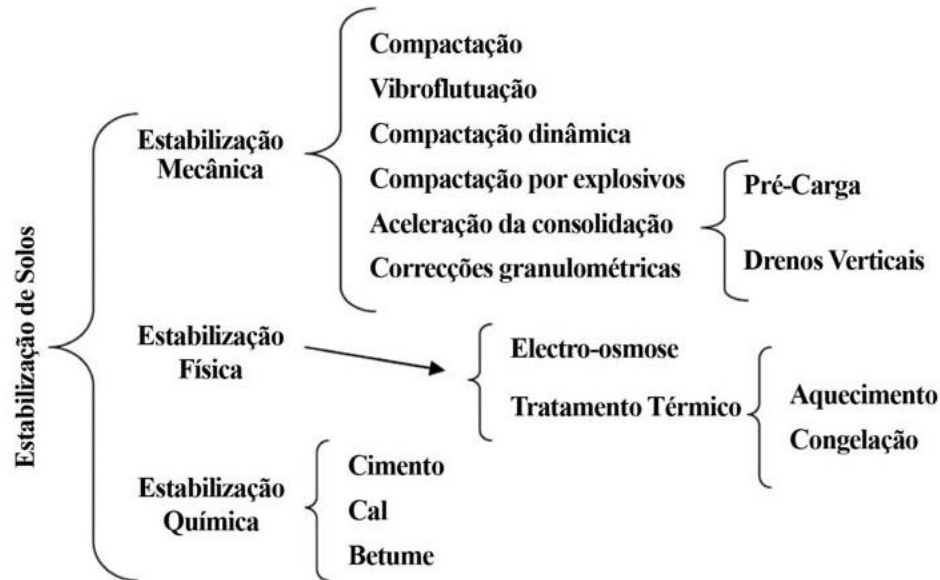
O maior déficit na estabilização de solos está na inexistência de testes simplificados que comprovem a real durabilidade da estabilização, tornando a característica mais difícil de ser aferida. Em solos naturais, a fraca durabilidade dos mecanismos, está vinculado ao teor insuficiente de argila, levando o solo a ruptura, erosão interna, fissuração e perda de ligações, que acarreta perda de material e desagregação, elevando o custo com manutenção. Já em solos estabilizados, é resultante da escolha inadequada do estabilizante ou teor insuficiente, induzindo a típica reação de superestimar. Que, além de não ser econômica, pode não ser a melhor alternativa do ponto de vista técnico, entretanto, a durabilidade de um solo estabilizado excede a durabilidade do natural (CRISTELO, 2001).

4.8 Métodos convencionais de estabilização de solos

Os mecanismos de estabilização de solos podem ser divididos em três grupos, sendo que os mesmos possuem ramificações em conformidade com a necessidade de correção de cada solo, conforme visto na FIG. 3. A estabilização mecânica visa melhorar os arranjos das partículas sólidas e/ou utilização da correção granulométrica do solo. Já na estabilização física, as propriedades do solo são reparadas através do uso de calor ou efeito de um potencial elétrico.

Enquanto que a estabilização química, procura melhorar as características do solo utilizando misturas com aditivos orgânicos ou inorgânicos (CRUZ; JALALI, 2010).

Figura 3 – Diagrama esquemático de métodos de estabilização de solos



Fonte: Cruz; Jalali(2010)

4.8.1 Estabilização química

A estabilização química consiste em um processo de alteração na estrutura do solo por inclusão de um ou mais aditivos ao solo, que ao se solidificarem ou reagirem com as partículas de solo, aglomerem, vedem os poros ou tornem o solo impermeável à água. Visando melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos solos, para que os mesmos sejam capazes de cumprir adequadamente a função a eles destinados (FRANÇA, 2003).

Segundo Hilário (2016), quando solos granulares são estabilizados quimicamente, pretende-se melhorar sua resistência ao cisalhamento, isto sucede por meio de adição de pequenas quantidades de ligantes entre as faces de partículas. Já em solos argilosos, é frequente a incorporação de aditivos que proporcionem a dispersão ou floculação das partículas. Os mesmos são compostos por estruturas floculadas e dispersas, que possuem maior predisposição a presença de água, influenciando a sua resistência ao cisalhamento.

No entendimento de Cruz e Jalali (2010), este tipo de estabilização apresenta-se como a melhor solução de estabilização para fins rodoviários, visto a grande variedade de solos encontrados em uma mesma obra. As fontes estabilizadoras podem ter maior ou menor eficiência, podendo variar com o tipo de solo, teor e tipo de adição incorporada a mistura,

temperatura, tempo de cura, teor de umidade e grau de compactação. Baseando-se nos ensaios de granulometria e nos limites de Atterberg, os agentes estabilizadores mais indicados para as categorias de solos obedecem ao seguinte esquema visto no QUADRO 2.

Quadro 2 – Escolha do agente estabilizador em função do tipo de solo

% que passa na peneira n° 200 < 25%	IP < 10%	Estabilização com cimento Estabilização com betume para base se o IP < 6%
	IP > 10%	Estabilização com cimento Estabilização com cal
% que passa na peneira n° 200 > 25%	IP < 10%	Estabilização com cimento Estabilização com cal
	10% < IP < 30%	Estabilização com cimento Estabilização com betume (adicionar cal para o IP < 10% (sub-bases) e IP < 6% (bases))
		Estabilização com cimento (adicionar cal suficiente para IP < 30%)
		Estabilização com cal
	IP > 30%	Estabilização com cal

Fonte: Gorski (2010)

4.8.1.1 Estabilização de solos com cimento

A estabilização efetuada com cimento é obtida através de mistura homogênea de solo, cimento Portland e água, que posteriormente deve ser compactado com teor ótimo de umidade previamente estabelecido. Resultando em produto com resistência mecânica e durabilidade definida através das reações de hidratação do cimento (ABCP, 1996).

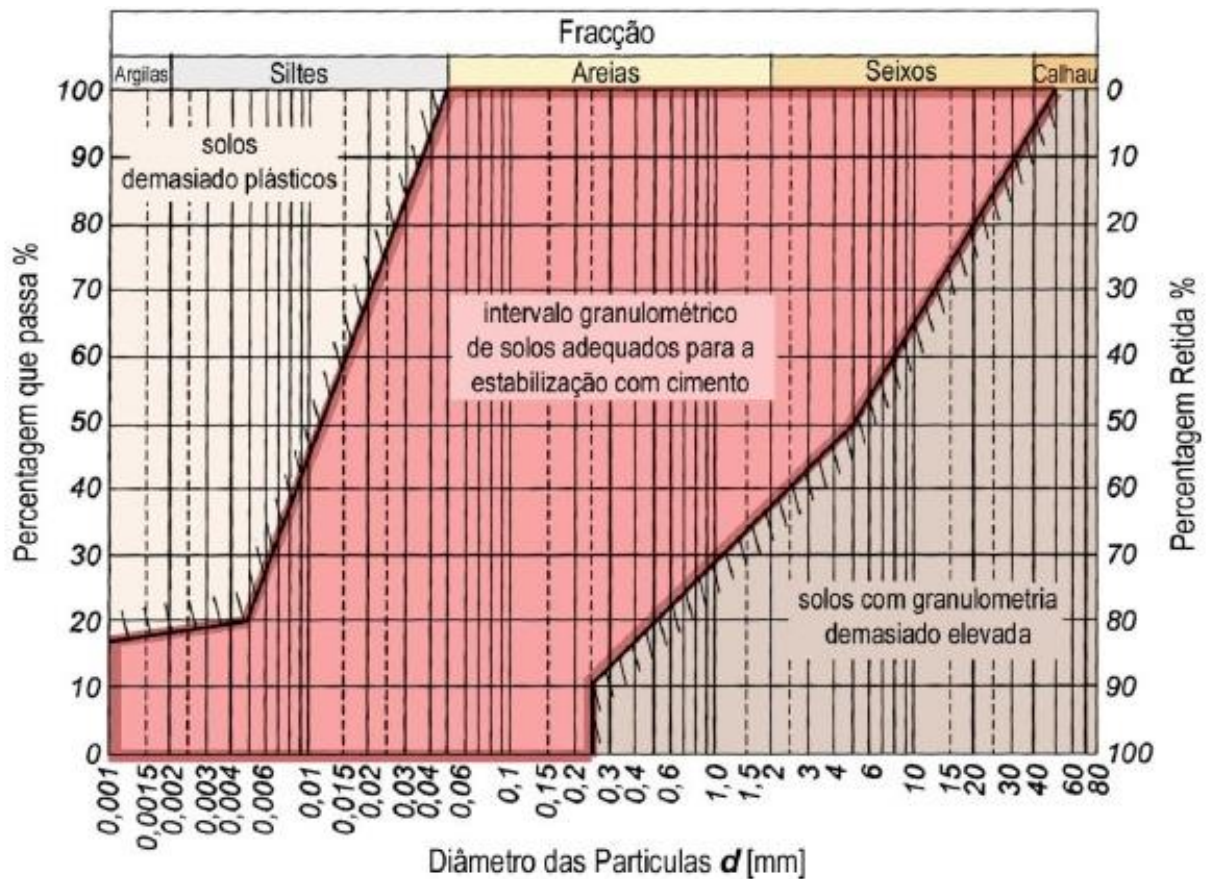
O cimento Portland é uma substância alcalina, constituída em sua maioria de silicatos e aluminatos de cálcio, que por processo de hidrólise, criam compostos cristalinos hidratados e gel. Quando incorporados ao solo envolvem as partículas granulares de solo, formando agregados que aumentam de tamanho continuamente com a hidratação e cristalização do cimento (LOPES, 2002).

Esta intervenção nas propriedades do solo é indicada para solos pouco ou não plásticos, apresentando teores de água adequados para impedir a execução dos serviços de terraplenagem, pois as forças de ligação entre as partículas constituinte de solos finos plásticos impedem a devida mistura com o cimento (SILVA, 2007). Entretanto, segundo Ribeiro (2002), os solos devem apresentar teor mínimo de fração fina, ou seja, teor de silte mais argila superior a 20%, pois solos com percentual inferior não conseguem atingir boa resistência inicial que propicie a compactação. Pode-se dizer que, em circunstâncias ideais, o solo que apresenta melhor

desempenho na estabilização é composto por 15% de silte e argila, 20% de areia fina, 30% de areia grossa e 35% de pedregulho.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland ABCP (1986, 2002), solos arenosos exigem menor quantidade de cimento na estabilização, são facilmente desfeitos, devido a baixa coesão interna, garantindo mistura homogênea com o cimento. Outro fator que influencia nas propriedades do solo-cimento é a presença de matéria orgânica na mistura, fato que irá originar inibição nas reações de hidratação do cimento, e conseqüentemente, redução da resistência mecânica, da durabilidade e da qualidade do produto final. Para o *Highway Research Board* (H.R.B.) a execução de solo-cimento para pavimentação, determina as seguintes características para o solo: diâmetro máximo: 75 mm; percentual que passa na peneira nº 4 (4,76 mm) > 50%; percentual que passa na peneira nº 40 (0,42 mm) > 15%; percentual que passa na peneira nº 200 (0,074 mm) < 50%; limite liquidez < 40% e limite de plasticidade < 18%. O esquema apresentado no GRAF. 5, exibe a granulometria propícia para estabilização utilizado solo-cimento, em função da porcentagem que passa ou fica retida.

Gráfico 5 – Granulometria adequada para estabilização solo-cimento



Fonte: Gorski (2010)

Ainda segundo a ABCP (1986), a determinação do teor de cimento adequado, respalda-se no fato de que pequenas quantidades de cimento misturadas ao solo, devidamente compactadas e curadas, garantem ao mesmo, melhorias nas suas propriedades, e permanência das características adquiridas ao longo do tempo, sob a ação de cargas e da variação das condições climáticas. Quando os teores de cimento são superiores a 5%, objetivam a ação aglutinante do aditivo, ou seja, cimentação das partículas do solo, adquirindo aumento de resistência mecânica. Entretanto, quando os teores de cimento são inferiores a 5%, visam alteração da fração argilosa do solo, isto é, redução da plasticidade, portanto o solo pode ou não ser beneficiado com o acréscimo da resistência (CRISTELO, 2001). A ABNT NBR 12253 (ABNT, 2012 c), fixa dosagens de solo cimento para o emprego como camada de pavimento, como apresentado na TAB. 2.

Tabela 2 – Teor de cimento sugerido para estabilização

Classificação do solo, segundo a ASTM D 3282 D 3282	Teor de cimento sugerido, em massa (%)
A1 - a	5
A1 - b	6
A2	7
A3	9
A4	10

Fonte: ABNT (2012 c)

4.8.1.2 Estabilização de solos com cal

O produto obtido pela mistura homogênea de solo, água e cal em proporções estabelecidas em laboratório, intitula-se solo-cal, ou seja, deseja-se melhorar alguma característica do solo, como a expansibilidade, umidade ou plasticidade elevada. Após a mistura ser devidamente compactada e endurecida, denomina-se estabilização com cal, isto é, a camada fornece resistência para suportar a aplicação de cargas (AZEVEDO, 2010).

De maneira genérica a cal reage bem com todos os solos de granulometria fina, beneficiando a trabalhabilidade, plasticidade e expansibilidade. Entretanto, alguns tipos de cal apresentam melhor eficácia quando aplicadas a determinados solos. Segundo Gorski (2010), para obtenção de melhores resultados deve-se seguir as seguintes recomendações:

- **Cal hidratada, ou apagada a seco ($\text{Ca}(\text{OH})_2$):** Deve ser aplicada na estabilização de solos médio-coesivos ou de forma combinada com o cimento afim de otimizar a ligação em solos muito coesivos, ácidos ou orgânicos.

- **Cal hidráulica (2CaOSiO_2 , CaOAl_2O_3):** Deve ser aplicada na estabilização de solos pouco coesivos, com índice de plasticidade inferior a 10, ou para a areia grossa, com índice de plasticidade inferior a 30.
- **Cal viva moída (CaO):** Deve ser aplicada na estabilização ou melhoria de solos médio ou muito coesivos, solos ácidos ou orgânicos.

Além da aplicação de cal adequada ao tipo de solo, sabe-se que é necessário empregar na mistura um teor de umidade ótimo, para garantir o sucesso das reações entre a cal e a argila, impedindo a formação de núcleos de cal não hidratada, que podem fragilizar a mistura. A temperatura também é outro fator que intervém no resultado final, pois, temperaturas de cura em torno de 60°C , fazem com que as resistências evoluem rapidamente, enquanto que a baixas temperaturas retardam o ganho de resistência (SARTORI, 2015).

Sabe-se que, a adição de cal ao solo modifica suas características, entretanto o emprego de cal pode decorrer de duas formas, dependendo do objetivo e teor de cal utilizado, conforme exibido na TAB. 3. Segundo Ferraz (1994), o solo pode ser modificado com cal, ou seja, este tipo de estabilização visa redução da plasticidade e aumento da trabalhabilidade do solo. Ou o solo pode ser cimentado pela cal, isto é, deseja-se alcançar um produto com maior resistência e durabilidade.

Tabela 3 – Percentual de cal necessário para melhorar e estabilizar solos

Tipo de solo	Porcentagem de cal para modificação	Porcentagem de cal para estabilização
Rocha muito fraturada	2% - 4%	Não recomendado
Argila bem graduada	1% - 3%	3%
Areia	Não recomendado	Não recomendado
Argila arenosa	Não recomendado	5%
Argila siltosa	1% - 3%	2% - 4%
Argila gorda	1% - 3%	3% - 8%
Argila muito gorda	1% - 3%	3% - 8%
Solo orgânico	Não recomendado	Não recomendado

Fonte: ADAPTADO CRISTELO (2001)

Segundo o Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes – DNIT (2006) e Azevêdo (2010), a estabilização de solos com cal pode ocorrer por três processos:

- **Troca de íons e floculação:** Estas reações são processos interdependentes, que promovem a modificação do solo instantaneamente após a mistura. É promovido a redução da plasticidade do solo, seja pelo elevação do índice de plasticidade, pela redução do limite de liquidez, ou combinação dos mesmos. Bem como, a redução da

expansão e contração do solo, promovendo um solo mais estável, frente as variações de umidade.

- **Cimentação pozolânica:** É uma cimentação forte, que gera acréscimo de capacidade de suporte ao solo, pois a aglomeração de partículas do solo floculadas após contato com cal, possui predisposição a formar silicatos e aluminatos hidratados de cálcio ao longo do tempo. Outro fator importante é o acréscimo de resistência contra erosão, seja ela por gravidade, como por capilaridade. Pois, apesar do solo não se tornar impermeável, ele sofre menor incidência da passagem de água entre os poros. Este é um processo gradativo e lento, que pode demorar meses ou anos para conclusão, entretanto a cura de 2 a 7 dias é suficiente para liberação do tráfego sobre a camada estabilizada.
- **Carbonatação:** Esta reação consiste em uma cimentação debilitada entre a cal e o dióxido de carbono do ar, formando o carbonato de cálcio e magnésio. Este tipo de reação enfraquece a mistura solo-cal, pois flocula as partículas de cal, impedindo a reação com as partículas argilosas, bem como, aumenta a plasticidade do solo. Claramente as reações de carbonatação devem ser evitadas, pois irão reduzir a quantidade de cal disponível no solo que deveriam ser consumidas por reações pozolânicas, impossibilitando a conquista de resistências mais significativas.

4.8.1.3 Estabilização de solos com betume

Os materiais betuminosos são compostos por hidrocarbonetos pesados, solúveis em bissulfetos de carbono (CS_2), que apresentam característica de aderência aos agregados. Se comportando como um aglutinante no caso de solos arenosos, aos quais é oferecidos coesão, e impermeabilizante no caso de solos coesivos, o que favorece o controle da perda de resistência devido ao aumento no teor de água (GORSKI, 2010).

Segundo o Departamento Nacional de estradas e Rodagem – DNER (1996), são empregados os seguintes matérias betuminosas para fins de pavimentação:

- **Cimentos Asfálticos:** São produtos obtidos pela destilação do petróleo em refinarias, denominado CAP, ou do asfalto natural encontrados em jazidas, intitulado CAN. São comumente usados para fins de pavimentação devido às suas propriedades aglutinantes, impermeabilizantes, flexibilidade, durabilidade e alta resistência à ação dos ácidos, sais e alcalis. Possuem estados sólidos ou semi-sólidos, coloração preta brilhante, sem odor, temperatura normal, sendo necessário aquecimento para sua aplicação, bem como aquecimento do solo.

- **Asfalto Diluído:** Também conhecidos como “cut-backs”, são formados a partir de diluições de cimentos asfálticos em solventes de petróleo de volatilidade apropriada. Eles possuem estado líquido, coloração preta brilhante e o odor dos solventes, são comumente empregados quando há necessidade de eliminação ou redução do aquecimento.
- **Emulsão Asfáltica:** São produzidas através da combinação de água e asfalto aquecido, em meio demasiado agitado e na presença de agentes emulsificantes, que podem ser aniônicos, ou seja, conferem ao produto carga elétrica negativa que mantém seus glóbulos separados; e catiônicos, que possuem cargas elétricas positivas, portanto aproximam os glóbulos de betume. Esses emulsificantes objetivam contribuir na estabilidade da mistura, e beneficiar a dispersão e o revestimento dos glóbulos de betume de uma película protetora, mantendo-os em suspensão. As emulsões são normalmente encontradas no estado líquido, possuem coloração marrom e odor de solvente ou emulsificante, portanto, não necessitam de aquecimento antes da utilização.
- **Alcatrão:** São geralmente subprodutos de destilação destrutiva do carvão, linhito ou madeira, podendo formar distintos estados de resíduos de acordo com sua destilação. Eles podem apresentar característica líquida, viscosa e piche, possuem também coloração preta e odor de creosoto.

Segundo Gorski (2010), os betumes líquidos “cut-backs” e as emulsões betuminosas são as mais empregadas na estabilização de solos, pois apresentam fluidez a temperatura ambiente, dispensando então o aquecimento antes da aplicação. Em geral, os melhores solos a serem estabilizados por materiais betuminosos são as areias siltosas, que necessitam de 4 a 8% de betume em relação ao peso seco do solo; as argilas arenosas, que compreendem 8 a 10% de teor de betume para estabilização; e as argilas que contenham um teor de matéria orgânica $\leq 2\%$, atingindo capacidade de suporte satisfatória com teor de betume variando de 4 a 8% em sua composição.

4.8.2 Estabilização mecânica

Neste tipo de estabilização, almeja-se alteração no ângulo de atrito interno das partículas, bem como, acrescentar coesão entre as mesmas, ou ambos os parâmetros. Esta técnica consiste em procedimentos que modificam o arranjo das partículas do solo, por processo de compactação, como por adição ou retirada de frações de solo, ou seja, é executada a correção granulométrica do solo (RIBEIRO, 2002).

O processo de compactação consiste na redução do índice de vazios do solo, obtida por aplicação de força mecânica, fornecendo aos solos aumento na resistência ao cisalhamento e na capacidade de suporte. Entretanto, a execução da compactação de modo isolado não indica um processo de estabilização, logo, é na verdade um artifício complementar das técnicas de estabilizações que utilizam algum aditivo incorporado ao solo (ARRIVABENI, 2017).

A execução de correção granulométrica de um solo confere ao mesmo, correção do índice de plasticidade e do limite de liquidez. Que é obtida através adição ou retirada de partículas, ou seja, é misturado um solo de elevada coesão, com outro solo com características arenosas, como forma de obter propriedades ideais de resistência e trabalhabilidade que se enquadrem na especificação de projeto (HILÁRIO, 2016).

4.8.2.1 Compactação

Segundo Caputo (1988), a compactação de solos consiste em um processo manual ou mecânico que visa reduzir o índice de vazios, obtido através da expulsão do volume gasoso, onde não há alteração considerável no volume de água no solo. Em geral, quanto maior a compactação, maior será a resistência e menor será a deformabilidade e a permeabilidade.

O grau de compactação de um solo é determinado em função da massa específica seca, que está diretamente relacionada ao teor de umidade e energia fornecida no momento da compactação. Esse fenômeno deve-se, ao fato de que, quanto maior a energia aplicada, maior será a compactação alcançada, porém, se aplicado sob condições de pequena umidade será apresentado atrito de grão com grão, impedindo seu entrosamento e atingindo grandes densidades. Em contrapartida, se a umidade for muito alta, os grãos ficaram saturados, portanto, não ofereceram resistência a compactação e as densidades serão reduzidas, pois os filmes de água aumentam de espessura com o crescimento da umidade. Logo, é necessário alcançar uma umidade ótima de compactação, para o qual é alcançada uma massa específica aparente seca máxima (VARGAS, 1977).

Segundo Craig (2004) os solos são compactados por efeito individual ou combinado de pressão, impacto e vibração, sendo os mais usados em campo os seguintes equipamentos:

- **Rolos Lisos:** Rolo de aço cuja massa produz superfície lisa na camada compactada. São indicados para pedregulhos, areias, pedra britada, lançadas em camadas de até 15cm.
- **Rolos Pneumáticos:** Equipamento compressor, onde as rodas estão situadas próximas entre si em dois eixos, o conjunto traseiro intercala o dianteiro para assegurar

cobertura completa. Eles produzem no solo efeito de amassamento, gerando superfície lisa e pequena ligação entre as camadas. Indicado para graduação fina arenosa.

- **Rolos Pés-de-Carneiro:** Equipamento formado por tambor oco de aço, com várias patas solidarizadas, que permitem excelente ligação entre as camadas compactadas e melhoram a homogeneidade, pois quebram os torrões de material duro. São indicados para solos fino, plásticos ou não, e para solos grossos com mais de 20% de finos.
- **Rolos de Grade:** Possuem superfície dos rolos compostas por rede de barras de aço que formam uma grade com orifícios quadrados. São indicados para a maioria dos solos grossos.
- **Rolos Vibratórios:** São rolos lisos com mecanismo motorizado de vibração. São indicados para solos grossos com pouca ou nenhuma fração de finos.
- **Placas Vibratórias:** É constituída por uma placa de aço com bordas apontadas para cima, ou placa curva, em que é montado um vibrador. É indicado para a maioria dos tipos de solo.
- **Soquetes Mecânicos:** São controlados manualmente, geralmente movidos a gasolina e usados para compactação de pequenas áreas.

4.9 Estabilizante líquido industrial

O estabilizante líquido industrial é um produto químico para solos, classificado como um material orgânico, derivado de resinas e óleos vegetais, que desempenham inversão das polaridades das partículas do solo. Promovendo acréscimo da coesão por trocas catiônicas, reduzindo a absorção de água, o acréscimo capilar e a tensão de sucção do solo, aumenta o CBR e reduz a expansão dos solos.

O estabilizante químico industrial é uma solução límpida, com coloração verde ou castanha e odor característico. Composto de características não tóxicas, nem corrosivas, que possuem caráter aniônico, não volátil a temperatura ambiente, bem como, propriedades com inexistência de radioatividade e que não poluem o meio ambiente. O estabilizante apresenta densidade mínima aos 25 °C de 1,035 g/cm³, com viscosidade na mesma especificação de 12 s, pH máximo à solução de 1% de 10,5, é composto de 39% de sólidos totais a 105 °C no período de 3 horas. Não apresenta mudança de estado físico e turbidez através de resfriamento de 0 °C

a 5 °C no período de 3 horas, possui total solubilidade em água e vida útil de 15 anos se devidamente acondicionado.

O respectivo produto é indicado para obras de pavimentação de estradas e rodovias como base, sub-base ou reforço de sub-leito, pavimentos urbanos e rurais, ruas, estradas rurais, fundações industriais, pátios de estacionamento, aeroportos, ciclovias, terreiros para secagem de café, confinamentos e também como impermeabilizantes de lagoas, tanques de piscicultura, lagoas de afluentes, aterros sanitários e contenção de taludes. Entretanto, o estabilizante líquido deverá ser dosado em peso, em relação a densidade máxima aparente seca do solo (γ_s), e ser utilizado de maneira combinada com um reagente, como a cal hidratada, o cimento e o sulfato de alumínio, que deverão ser escolhidos em função do tipo de solo a ser estabilizado.

A cal hidratada é um aglomerante obtido através do tratamento de cal virgem, com quantidade suficiente de água para satisfazer a afinidade química sob condições de hidratação. Dentre as cales hidratadas, as dolomíticas são as que apresentam maior variação de resistência, seguidas das cales calcíticas que produzem menores resistências comparadas às dolomíticas e posteriormente as cales magnésias que produzem baixa resistência (FERRAZ, 1994). A sua utilização em percentuais variando de 2 a 3% em peso, devidamente misturada a solos predominantemente argilosos ou siltosos, seguida de adição de solução estabilizante líquido de solos, com teor variando de 1:1500 a 1:2000 associado à volume de água necessário para atingir umidade ótima de compactação. Obteremos uma mistura devidamente homogeneizada, na umidade ótima de compactação, composta de solo, estabilizante líquido, reagente e água que deverá finalmente receber o processo de compactação de partículas, garantindo o processo de estabilização.

Já o cimento é um pó com propriedades aglutinantes, aglomerantes ou ligantes, que endurecem após contato com água. Ele é obtido através da britagem, moagem de rocha calcária que posteriormente é misturada com argila moída. Esta mistura é aquecida em forno giratório que através do calor intenso transforma a mistura em um produto em forma de pelotas, denominado clínquer, que é o composto que está presente em todos os tipos de cimento. Após saída do forno, o clínquer é bruscamente resfriado para finalmente ser moído e transformado em pó. O que distingue os diferentes tipos de cimento são as adições e a proporção em que são adicionadas ao clínquer na fase de moagem, essas adições podem ser o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozzolânicos e os materiais carbonáticos (ABCP, 2002). De modo geral, pode-se utilizar o cimento como reagente em solos preferencialmente arenosos e argilo-arenoso, pois, recomenda-se utilização do cimento em solos siltosos e muito argilosos somente em casos extremos onde o custo do cimento seja menor que o da cal hidratada. Este tipo de

combinação deverá seguir as mesmas especificações do solo combinado com cal, onde deverão ser homogeneizados ao solo percentual de 2 a 3% de cimento e seguida da adição de solução estabilizante líquido de 1:1500 a 1:2000 diluído em volume de água necessário para atingir umidade ótima, que em sequência deverá receber compactação para complementação da estabilização.

Por sua vez, o sulfato de alumínio é um produto encontrado em forma de pó ou granulado, que apresenta formula química $Al_2(SO_4)_3 \times n H_2O$, com n igual a 14,3 ou 18. Conforme temperatura empregada, são obtidas as constantes de solubilidade das distintas espécies hidrolisadas do alumínio em equilíbrio com o precipitado $Al(OH)_3(p)$. O produto comercializado em forma de pó ou granulado, com formula química $Al_2(SO_4)_3 \times 14 H_2O$, é comumente distribuído em sacos ou a granel e apresenta solubilidade de 53 a 55% ($t = 25^\circ C$). Já a solução de sulfato de alumínio, é desenvolvida a partir do produto em pó ou granulado, com concentração de 10 a 200 g/L (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Aplicando teor de 1:1000 a 1:2000 de estabilizante líquido industrial, à solos predominantemente arenosos, argilo-arenosos ou silte-arenosos, seguida da adição da metade de água necessária para atingir a umidade ótima de compactação. E posteriormente combinado com teor de 1:5000 do reagente sulfato de alumínio e a metade restante de água. Deverão ser adequadamente homogeneizados, onde será alcançada uma mistura com umidade ótima, composta por solo, estabilizante líquido, reagente e água, que posteriormente deverá receber compactação para ampliação dos resultados.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para desenvolvimento do trabalho foi escolhido como ponto de coleta da amostra arenosa, o Município de Divinópolis, situado nas coordenadas 20°10'16.7" S, 44°54'47.6" W, já para a amostra argilosa, o Município de Itapecerica, sob as coordenadas 20°28'30.1"S, 45°02'14.9"W, ambos localizados a oeste do Estado de Minas Gerais, Brasil. Que representam pontos nos quais já eram conhecidas as características granulométricas requeridas para análise da variação de resistência mecânica dos solos quando incorporado o aditivo líquido industrial.

As mesmas foram extraídas por meio da utilização de pás, enxadas e picaretas, tomando-se cuidado para evitar amostras contaminadas por matéria orgânica. Posteriormente, receberam preparação com secagem prévia ao ar, até atingir a umidade higroscópica, homogeneizadas e passadas na malha de 4,8mm, conforme descrito na norma ABNT NBR 6457 (ABNT, 2016 a).

A preparação das amostras não deformadas, assim como a moldagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios geotécnicos, foi realizada no laboratório de Ciências da Terra, do Centro Universitário de Formiga – UNIFOR-MG.

Para realização dos ensaios foi empregado estabilizante líquido industrial, assim como reagentes do mesmo, isto é, cimento Portland CP-II-E 32 e cal hidratada do tipo CH-III, comerciais do Município de Itapecerica – MG, dado que, os reagentes são insumos indispensáveis na estabilização de solos utilizando o estabilizante líquido industrial testado. Os reagentes foram caracterizados em ensaios de laboratório por Ferraz (1994), como mostrado na TAB. 4 e TAB. 5.

Tabela 4 – Composição química do cimento utilizado

Componente	Teor (%)
SiO ₂	21,87
Al ₂ O ₃	5,65
Fe ₂ O ₃	3,22
CaO	57,29
MgO	2,68
SO ₃	2,89
K ₂ O	0,71
Cal livre	1,57

Fonte: Ferraz(1994)

Tabela 5 – Composição química da cal utilizada

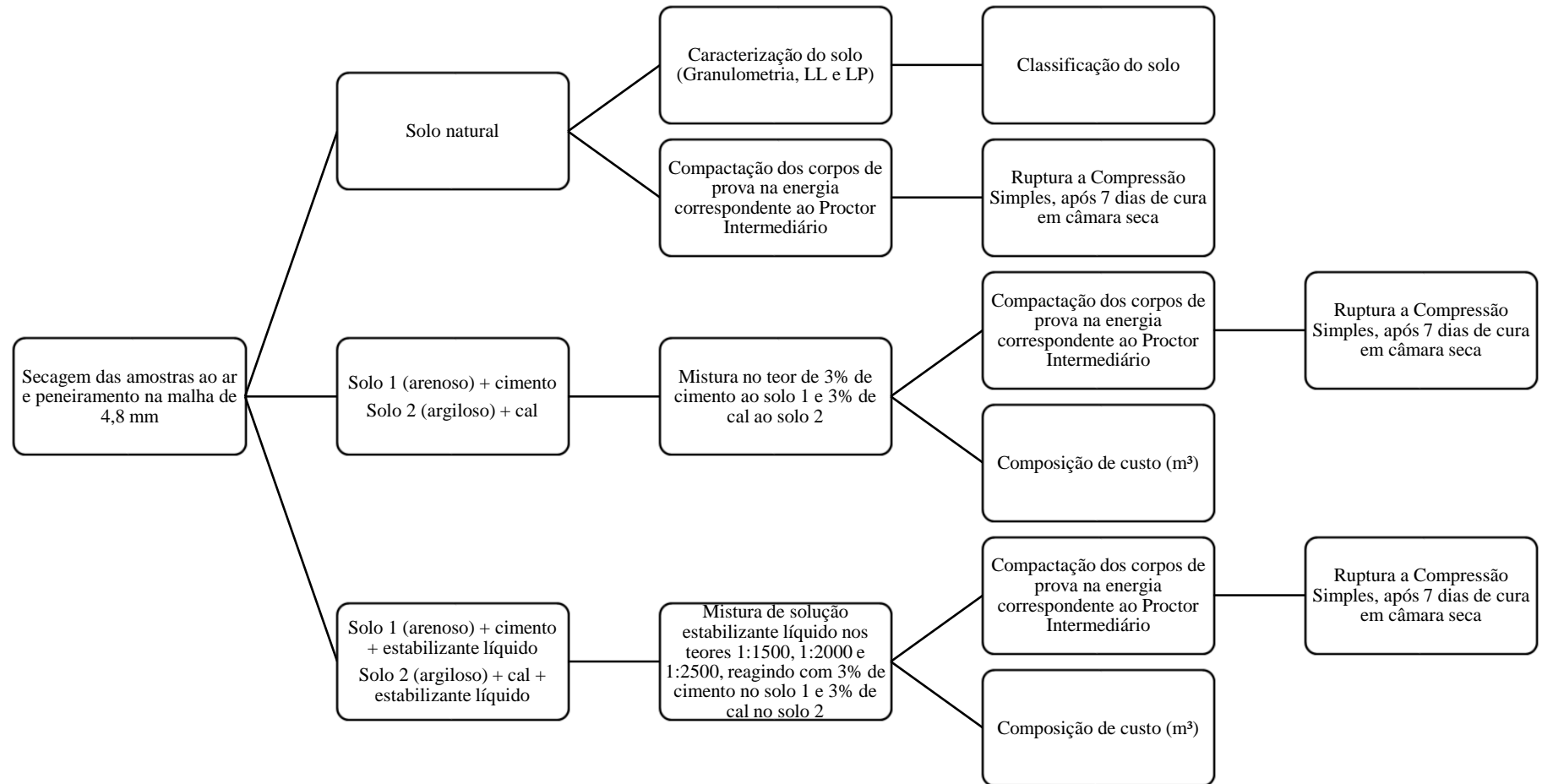
Componente	Teor (%)
CaO	74,00
MgO	0,70
SiO ₂	1,50
Perda por Calcinação	22,00
CaO disponível	70,00
Ca (OH) ₂ disponível	92,00
CaO na base não-volátil	92,00
CaO não-hidratado máximo	1,00
Umidade em excesso máxima	1,00

Fonte: Ferraz (1994)

A preparação das amostras não deformadas, assim como a moldagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios geotécnicos, foi realizada no laboratório de Ciências da Terra, do Centro Universitário de Formiga – UNIFOR-MG.

Na FIG. 4, estão sintetizados os procedimentos adotados nesta pesquisa, sendo que os mesmos estão descritos de maneira detalhada, nos itens a seguir.

Figura 4 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: A autora (2018)

5.1 Classificação dos solos

As classificações das amostras de solos foram executadas por intermédio de análise granulométrica, limite de liquidez e limite de plasticidade. A identificação das amostras de solos procedeu através da classificação pelo sistema de classificação H.R.B. (*Highway Research Board*) e pelo U.S.C. (*Unified Classification System*), seguindo os processos normativos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

As análises granulométricas dos dois solos coletados seguiram as recomendações da norma ABNT NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica (ABNT, 2017). Para iniciar os ensaios de análise granulométrica, foi tomado aproximadamente 80 g de solo argiloso e 120 g de solo arenoso e passando na peneira de 2,0 mm. Entretanto, nenhuma das amostras apresentou porcentagem retida na peneira de 2,0 mm, posto isto, foi realizado somente o peneiramento fino. Em seguida, as amostras foram lavadas na peneira de 0,075 mm e a porcentagem retida na peneira foi colocada em estufa a 110 °C. Após secagem, o material foi passado nas peneiras de 1,16, 0,85, 0,425, 0,30, 0,15, 0,075 mm, utilizando agitador mecânico, como visto na FIG. 5, e anotado com precisão de 0,0001 g as massas retidas em cada peneira.

Figura 5 – Execução do peneiramento fino



Fonte: A autora (2018)

Para determinação do Limite de Liquidez (LL), foram realizados os procedimentos prescritos na ABNT NBR 6459 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 2016 b). Inicialmente o material foi passado na peneira de 0,42 mm, e separado cercar

de 100 g de material para ser ensaiado. Em sequência, foi depositado o material em uma cápsula de porcelana e adicionado água destilada em pequenas proporções, para que fosse adquirida tal consistência onde sejam necessários cerca de 35 golpes para fechamento da rachadura.

O material foi homogeneizado com duração média de 20 minutos com a utilização de uma espátula e em seguida transferido parte da mistura para uma concha, onde a parte central apresentava espessura próxima de 10 mm. Posteriormente, a massa de solo foi dividida em duas partes iguais, através da passagem de um cinzel e golpeada contra a base, caindo em queda livre até a rachadura apresentar comprimento próximo de 13 mm ao longo das bordas inferiores, como visto na FIG. 6.

Figura 6 – Determinação do limite de liquidez



Fonte: A autora (2018)

Após o golpeamento a mistura foi transferida para cápsula metálica, pesada úmida e levada a estufa a 110 °C por 24 horas. Posteriormente, a mesma foi pesada em estado seco, como descrito no anexo da ABNT NBR 6457 – Determinação do teor de Umidade dos Solos (ABNT, 2016 a). O mesmo procedimento de ensaio foi refeito mais quatro vezes, de forma a obter 5 pontos de ensaio, cobrindo o intervalo de 35 a 15 golpes para fechamento da rachadura.

Já para determinação do Limite de Plasticidade (LP), foram utilizados os métodos prescritos na ABNT NBR 7180 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 2016 c), também apoiada nos processos de preparação de amostras com secagem prévia da ABNT NBR 6457 (ABNT, 2016 a). Foi tomado aproximadamente 100 g de material para ser ensaiado e inserido em cápsula de porcelana, onde foi adicionado pequenas quantidades de água destilada, compactando e homogeneizando a mesma por cerca de 20 minutos através da ajuda de uma espátula, como forma de garantir um cilindro de 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento. Separando uma amostra de aproximadamente 10 g, formou-se uma pequena

bola sobre superfície de vidro, que foi rolada com a palma da mão até formar um cilindro com as características anteriormente descritas e apresentadas na FIG. 7.

Figura 7 – Determinação do limite de plasticidade



Fonte: A autora (2018)

Após atingir as características requeridas para o cilindro sem se fragmentar, foi determinado à umidade da amostra como descrito no anexo da ABNT NBR 6457 (ABNT, 2016 a). A operação foi realizada três vezes, como forma de obter os parâmetros de umidade.

5.2 Diretrizes para execução do programa experimental

Segundo o fabricante do estabilizante industrial a determinação do teor adequado é realizado em função dos índices de CBR, redução da expansão e menor absorção de água por imersão. Entretanto, este trabalho propõem-se a analisar a variação de resistência mecânica dos solos com incremento do produto químico líquido, considerando que a ABNT NBR 12253 – Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento (ABNT, 2012 c), preconiza a utilização do ensaio de compressão simples, foi admitido o mesmo para análise das medidas de resistência alcançadas pelos solos.

Posto isso, a determinação das variáveis envolvidas nos ensaios de compressão simples e na análise comparativa de custo investigadas neste trabalho, foram efetuadas em função das recomendações do fabricante do estabilizante líquido, bem como, recomendações de trabalhos anteriormente publicados, em virtude da semelhança das características físicas e químicas dos produtos empregados.

Tendo em vista, a padronização dos teores de reagente, como ferramenta fundamental na comparação dos resultados de variação de resistência mecânica, adotou-se para desenvolvimento do programa experimental, o percentual de adição de cimento e cal igual a 3% em relação à massa de solo seca. Considerando que, o fabricante do produto líquido, fixa percentual de reagente variando entre 2 a 3%, para estabilização de solos atuando de modo associado.

Em função do roteiro de ensaios laboratoriais com estabilizante líquido industrial de solos, foi adotado na realização dos ensaios o emprego da solução de estabilizante líquido nos teores de 1:1500, 1:2000 e 1:2500 em peso, em relação a densidade máxima aparente seca do solo (γ_s). Sendo que, para obtenção da solução de estabilizante líquido, foi necessário diluir 5% do estatizante líquido puro em água destilada, em que a quantidade de solução foi estipulada em função do peso seco do solo e dosagem adotada, como exibido na Equação 4.

$$Q \text{ solução} = \frac{P \text{ seco}}{D} \div 0,05 \quad (4)$$

O teor de umidade ótimo para solo arenoso foi fixado por meio de análise das recomendações do trabalho elaborado por Gandolfi e Cardoso (2013) no valor correspondente a 11,7% e peso específico segundo Marcolin e Klein (2011), igual a 17,60 kN/m³, uma vez que o mesmo apresentou semelhança entre os índices físicos e a mesma classificação granulométrica pelo sistema H.R.B. (*Highway Research Board*). Da maneira análoga, para o solo argiloso foi definido o teor de umidade ótimo equivalente a 17,8%, e peso específico igual a 15,63 kN/m³, baseando-se na verificação dos resultados do trabalho de Oliveira (2010).

5.3 Ensaio de resistência à compressão simples

No desenvolvimento dos ensaios foi tomado como referência na as normas ABNT NBR 12024 (ABNT, 2012 a), e ABNT NBR 12025 (ABNT, 2012 b), pois as misturas constituídas de cal e estabilizante líquido não possuem normatização, além de, permitir avaliar de maneira igualitária a capacidade de resistência de cada corpo de prova para posterior comparação de resultados. A moldagem de todos os corpos de prova usados na determinação da resistência à compressão simples dos solos, foram realizadas por processo dinâmico na energia do proctor intermediário, que corresponde a aplicação de 21 golpes em três camadas de solo, utilizando

soquete com massa igual a 4,536 kg e cilindro de 10 cm de diâmetro, 12,73cm de altura e 1.000 cm³ de volume, como visto na FIG. 8. Foi tomado como referência a média de duas determinações, para cada uma das análises de resistência à compressão simples.

Figura 8 – Equipamentos Proctor Intermediário

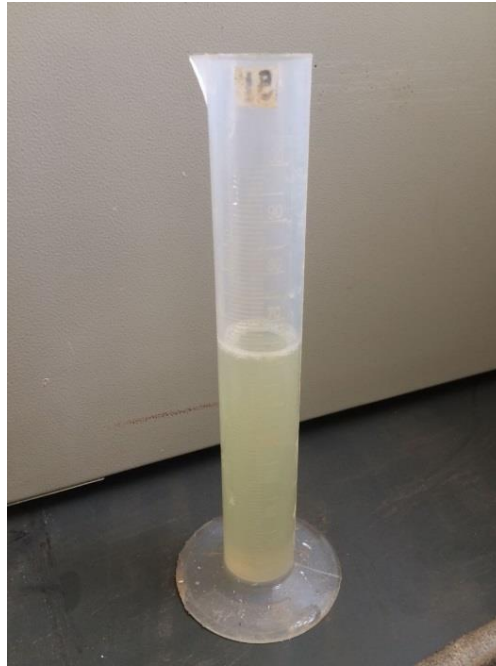


Fonte: A autora (2018)

Para iniciar os ensaios as duas amostras de solo foram passadas na peneira de 2,00 mm, e descartado o material retido. Para os ensaios sem mistura, foi imediatamente misturado ao mesmo água em pequenas quantidades, até atingir a umidade preestabelecida. Já para confecção dos corpos de prova com mistura, foi homogeneizado a amostra de solo arenoso o teor de 3% de cimento e a mostra de solo argiloso o teor de 3% de cal em peso em relação à massa de solo seco, para posteriormente ser adicionado água a mistura, até que as mesmas alcançassem a umidade requerida.

De maneira análoga, os ensaios que possuíam estabilizante líquido em sua composição, receberam procedimento preliminar de homogeneização de 3% de cimento ao solo arenoso e 3% de cal ao solo argiloso. Em sequência, foi diluído em água destilada 5% de estabilizante líquido puro, conforme visto na FIG. 9, alcançando uma solução de estabilizante, como forma de garantir melhor homogeneização ao solo. Posteriormente, a solução preparada foi adicionada nas dosagens de 1:1500, 1:2000 e 1:2500 e homogeneizada, para em seguida ser adicionado quantidade de água restante, para que a somatória de água e estabilizante alcance a umidade total especificada.

Figura 9 – Solução de estabilizante líquido industrial



Fonte: A autora (2018)

Após a conclusão do processo de homogeneização das amostras, foi fixado o molde cilíndrico a base, acoplado um cilindro complementar e adicionado às respectivas amostras em três camadas, aplicando 21 golpes por camada compactada. Após o término da compactação, foi retirado o cilindro complementar, nivelado o material da superfície do molde cilíndrico e removida a amostra do molde com auxílio de um extrator (FIG. 10).

Figura 10 – Corpo de prova cilíndrico



Fonte: A autora (2018)

Em seguida foi determinado a massa do corpo de prova e transferido para câmara seca. Como forma de determinação da umidade foi separado pequena quantidade de amostra em cápsula metálica, pesado o conjunto e levado a estufa a 110 °C durante o período de 24 horas, como mostrado na FIG. 11 e descrito no anexo da norma ABNT NBR 6457 – Determinação do teor de Umidade dos Solos (ABNT, 2016 a).

Figura 11 – Determinação da umidade



Fonte: A autora (2018)

Após passados 7 dias de cura seca, os corpos de prova foram rompidos em máquina universal de ensaios automática WAW-1000 de sistema eletro-hidráulico, conforme mostrado na FIG. 12, e anotados os carregamentos máximos, para determinação da resistência à compressão simples e posterior comparação de resultados.

Figura 12 – Ruptura dos corpos de prova em máquina universal de ensaios



Fonte: A autora (2018)

5.4 Análise comparativa de custo

Para compor a análise de custo e completar o estudo das condicionantes envolvidas na estabilização de solos dispondo de estabilizante líquido industrial, foi adotado como referência a composição de custo 40375, do software para engenharia Orçafascio, que contempla as operações construtivas da estabilização solo-cimento em 3% do peso da pista, conforme apresentado na TAB.6.

Em função da semelhança no processo executivo do estabilizante líquido, assim como pelo baixo teor de produto diluído em água suficiente para atingir a umidade ótima junto ao no caminhão tanque. Foram fixados para todos os tratamentos químicos os índices de utilização para equipamentos e mão de obra. No entanto, segundo as recomendações do fabricante do estabilizante líquido, para estabilização de solos com características muito plásticas, a mistura de solo + reagente + estabilizante líquido após homogeneizada deve receber processo de cura durante o período mínimo de 24 horas, e ser homogeneizada novamente após este período, para que o solo perca a plasticidade. Logo, nas composições de custo do solo argiloso que englobam estabilizante líquido, a quantidade de trator agrícola e grade de disco foram duplicadas.

Tabela 6 – Composição de custos referência

Equipamentos	Quant.	Utilização	
		Operativa	Improdutiva
Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	1,00	0,63	0,37
Grade de 24 discos rebocável de 24"	1,00	0,56	0,44
Motoniveladora - 93 kW	1,00	0,92	0,08
Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00	0,14	0,86
Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 KW	1,00	1,00	0,00
Caminhão carroceria madeira - 15T	1,00	1,00	0,00
Trator agrícola - 77 kW	1,00	0,56	0,44
Mão de Obra	Quant.	Unidade	
Encarregado	1,00	h	
Gredista	1,00	h	
Servente	13,00	h	
Material	Quant.	Unidade	
Cal Hidratada III	Variável	kg	
Cimento Portland CP II - 32	Variável	kg	
Estabilizante Líquido Industrial	Variável	l	

Fonte: ADAPTADO Orçafascio (2015)

Visando melhor adequação aos custos unitários vigentes, foi admitido os valores do Manual de Custos de Infraestrutura e Transportes desenvolvido pelo DNIT (MAIO/2018) do

estado de Minas Gerais, como exibido na TAB. 7. Em virtude da inexistência do custo unitário para o estabilizante líquido industrial junto ao DNIT, o mesmo foi cotado na empresa responsável pela comercialização do produto. É importante ressaltar que, o custo horário da mão de obra contempla a incidência de ferramentas manuais, EPI, alimentação e transporte.

Tabela 7 – Custo unitário

Equipamentos		Custo Operacional (R\$)	
		Operativa	Improdutiva
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	188,54h	48,88h
E9518	Grade de 24 discos rebocável de 24"	2,30h	1,60h
E9524	Motoniveladora - 93 kW	183,56h	77,61h
E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	143,54h	62,72h
E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 KW	125,18h	53,51h
M0424	Caminhão carroceria madeira - 15T	23,51h	0,00h
E9577	Trator agrícola - 77 kW	85,98h	30,95h
Mão de Obra		Custo Horário (R\$)	
P9884	Encarregado	24,11 h	
P9845	Gredista	25,32 h	
P9824	Servente	11,11 h	
Material		Preço Unitário (R\$)	
M0424	Cal Hidratada III	0,37 Kg	
M0424	Cimento Portland CP II - 32	0,30 Kg	
-	Estabilizante Líquido Industrial	50,00 l	

Fonte: ADAPTADO DNIT (2017)

Posto isso, foram estimados os custos para execução de 40m³ de solo, variando o teor de material incorporado a cada mistura, sendo que o peso específico estabilizante líquido igual a 1,035 g/cm³ do como exibido na TAB. 8.

Tabela 8 – Teores de estabilizante químico

	Massa de solo (kg/m ³)	Reagente		Estabilizante líquido	
		Descrição	Quant. (kg)	Descrição	Quant. (l)
Composição 1	70400	Cimento (3%)	2112,00	Inexistente	0
Composição 2	70400	Cimento (3%)	2112,00	Estabilizante Líquido (1:2500)	27,21
Composição 3	70400	Cimento (3%)	2112,00	Estabilizante Líquido (1:2000)	34,01
Composição 4	70400	Cimento (3%)	2112,00	Estabilizante Líquido (1:1500)	45,35
Composição 5	63320	Cal (3%)	1899,60	Inexistente	0,00
Composição 6	63320	Cal (3%)	1899,60	Estabilizante Líquido (1:2500)	24,47
Composição 7	63320	Cal (3%)	1899,60	Estabilizante Líquido (1:2000)	30,59
Composição 8	63320	Cal (3%)	1899,60	Estabilizante Líquido (1:1500)	40,79

Fonte: A autora (2018)

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do programa experimental, visando a investigação das alterações nas propriedades dos solos, incorporando estabilizante líquido de solos, reagindo com cal e cimento, por intermédio de ensaios de caracterização, resistência à compressão simples e a análise comparativa de custo, apresentam-se à seguir, assim como as discussões pertinentes.

6.1 Ensaio de classificação dos solos

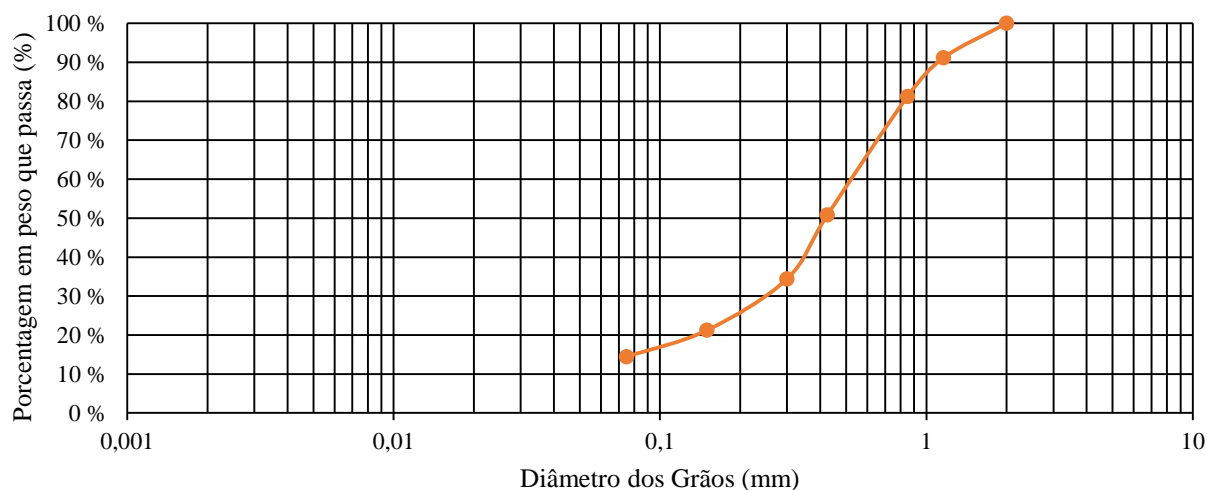
É exibido na TAB. 9, os resultados obtidos no ensaio de granulométrico do solo 1, como é apresentado no GRAF. 6 curva granulométrica característica do mesmo.

Tabela 9 – Composição Granulométrica solo 1

Peneira (mm)	1,16	0,85	0,425	0,30	0,15	0,075	Fundo
Peso total retido (g)	11,6043	13,0140	39,9693	21,5116	17,3296	8,9136	18,9308
% Passa	91,1602	81,2465	50,7991	34,4122	21,2110	14,4209	0
% Retida	8,8398	18,7535	49,2009	65,5878	78,789	85,5791	100

Fonte: A autora (2018)

Gráfico 6 – Curva Granulométrica solo 1



Fonte: A autora (2018)

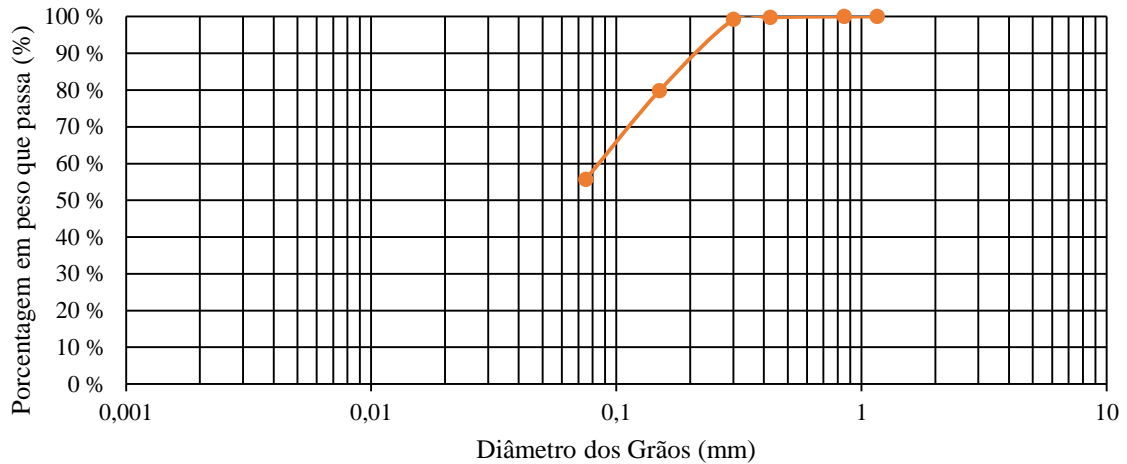
Na TAB. 10 apresentam-se as frações granulométricas encontradas no ensaio de peneiramento fino do solo 2, e no GRAF. 7 a curva de distribuição granulométrica característica.

Tabela 10 – Composição Granulométrica solo 2

Peneira (mm)	1,16	0,85	0,425	0,30	0,15	0,075	Fundo
Peso total retido (g)	0	0	0,1772	0,5540	18,0411	22,5230	51,8560
% Passa	100	100	99,8098	99,215	79,8475	55,6686	0
% Retida	0	0	0,1902	0,7850	20,1525	44,3314	100

Fonte: A autora (2018)

Gráfico 7 – Curva granulométrica do solo 2



Fonte: A autora (2018)

Foram determinados nos solos em seu estado natural o Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), sendo que, através destes, foram alcançados o Índice de Plasticidade (IP) e Índice de Grupo (IG) apresentados pelos solos, conforme exibido na TAB. 11.

Tabela 11 – Limites de consistência

Ensaio	Solo 1	Solo 2
Limite de Liquidez	53,00%	46,00%
Limite de Plasticidade	16,83%	20,68%
Índice de Plasticidade	36,17%	25,32%
Índice de Grupo	0	3,89

Fonte: A autora (2018)

Analisando os resultados apresentados pelos ensaios granulométricos e de índices de consistência, enquadrou-se os solos 1 e 2 segundo a classificação pelo sistema H.R.B. (*Highway Research Board*) e sistema U.S.C. (*Unified Classification System*) nas classificações apresentadas na TAB. 12.

Tabela 12 – Classificação dos solos

Classificação	Solo 1	Solo 2
H.R.B.	A2-7	A7-6
U.S.C.	SC	CL

Fonte: A autora (2018)

O solo 1 foi classificado segundo o sistema H.R.B., como um solo de bom comportamento no emprego de camadas de subleito, que possui os materiais constituintes variando de pedregulho a areias siltosas ou argilosas, permitindo adequada permeabilidade da água e ar, além de ser considerado pouco coesivo. Pela classificação U.S.C. o mesmo trata-se de um solo composto de areias-argilosas, ou seja, misturas de areia e silte.

Já o solo 2 foi enquadrado segundo o sistema H.R.B., como um solo predominantemente argiloso, que possui o material de sua composição com elevado índice de plasticidade, quando comparado aos valores do limite de liquidez. Apresentando variações de volume excessivas, portanto, trata-se de um solo que apresenta mau comportamento quando empregado como camada de subleito. Pela identificação pelo U.S.C. o solo é composto por argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade, isto é, argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.

Tendo em vista os resultados apresentados, verificou-se que o solo 1 encontra-se dentro dos limites requeridos para análise de resistência à compressão simples com adição de cimento e estabilizante líquido. Teoricamente é considerado mais eficiente a estabilização de solos granulares com a mistura de cimento, visto que, é necessário teor de cimento cada vez maior, com o acréscimo das frações de silte e argila. De maneira análoga, o solo 2 satisfaz os limites requeridos para adição de cal e estabilizante líquido, uma vez que, o mesmo apresenta predominância argilosa, que exibe maior superfície específica, e resultará em reações mais intensas entre as partículas de solo e cal (FERRAZ, 1994).

6.2 Ensaio de resistência à compressão simples

A média dos dois resultados encontrados nos ensaios de compressão simples, moldados na energia do proctor intermediário, sem imersão prévia dos corpos de prova aos 7 dias de idade, para os dois solos e suas respectivas adições são apresentadas na TAB. 13.

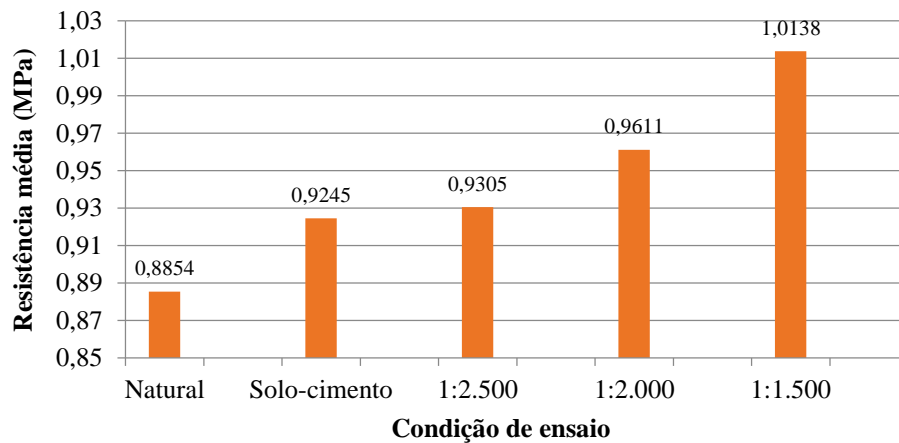
Tabela 13 – Resistência à compressão simples

Condição de ensaio	Resistência à compressão simples (MPa)
Solo arenoso natural	0,8854
Solo arenoso + 3% cimento	0,9245
Solo arenoso + 3% cimento + Estabilizante Líquido 1:2500	0,9305
Solo arenoso + 3% cimento + Estabilizante Líquido 1:2000	0,9612
Solo arenoso + 3% cimento + Estabilizante Líquido 1:1500	1,0138
Solo argiloso natural	0,8810
Solo argiloso + 3% cal	0,9378
Solo argiloso + 3% cal + Estabilizante Líquido 1:2500	0,9520
Solo argiloso + 3% cal + Estabilizante Líquido 1:2000	0,9655
Solo argiloso + 3% cal + Estabilizante Líquido 1:1500	0,9990

Fonte: A autora (2018)

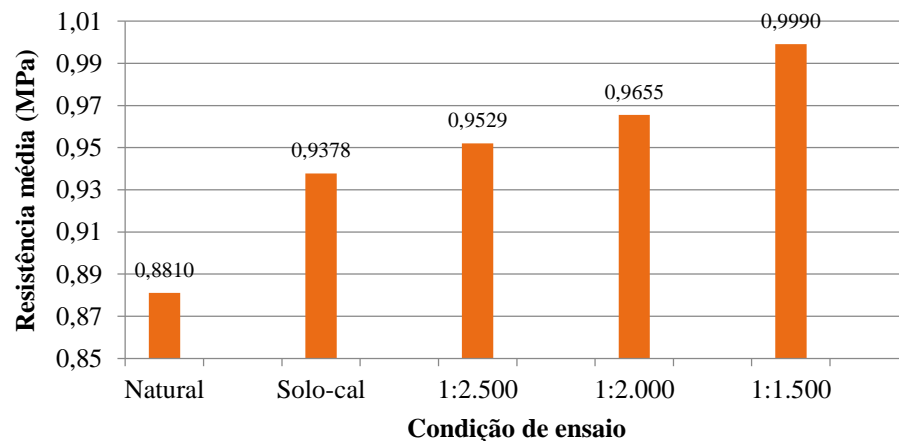
Os GRAF. 8 e 9 ilustram a variação de resistência à compressão simples, apresentadas pelo solo arenoso e argiloso respectivamente nas condições de ensaio exibidas na TAB. 13.

Gráfico 8 – Resistência à compressão simples do solo arenoso



Fonte: A autora (2018)

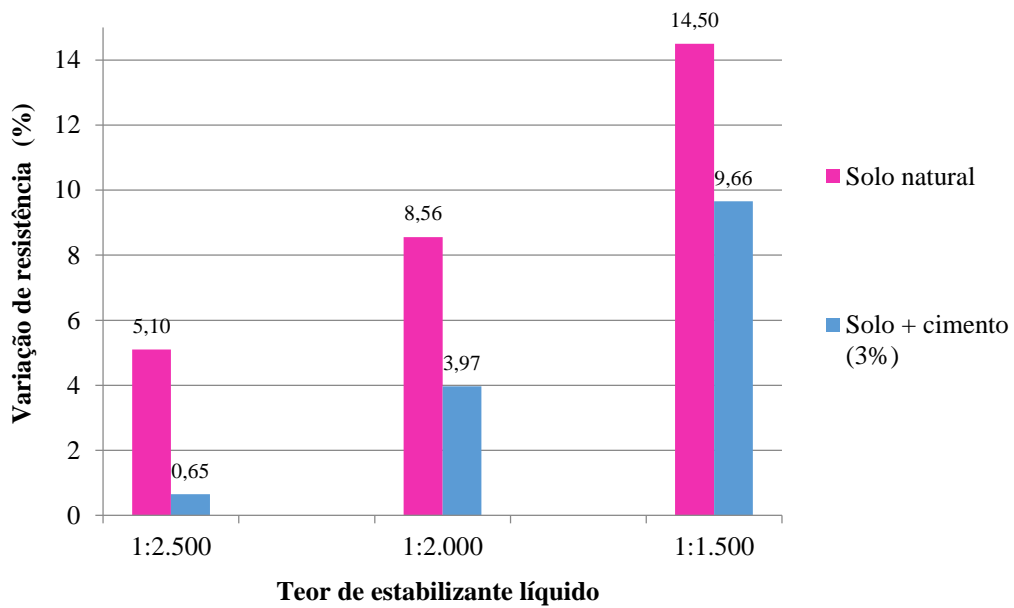
Gráfico 9 – Resistência à compressão simples no solo argiloso



Fonte: A autora (2018)

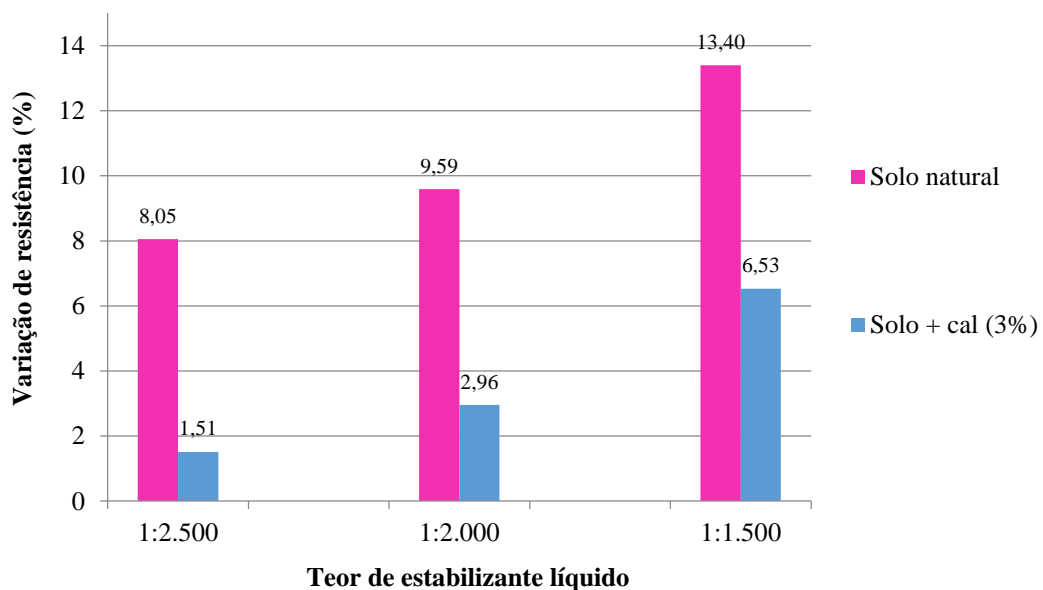
Com base nos resultados de resistência à compressão simples apresentados, trabalhou-se os mesmos para verificação dos resultados dos solos com adição do estabilizante líquido em relação a resistência obtida nos solo naturais e nos solos constituídos de cimento e cal de maneira isolada, sendo os resultados da comparação do solo arenoso exibido no GRAF. 10, e do solo argiloso no GRAF. 11.

Gráfico 10 – Comparação da resistência desenvolvida pelo solo arenoso



Fonte: A autora (2018)

Gráfico 11 – Comparação da resistência desenvolvida pelo solo argiloso



Fonte: A autora (2018)

A partir dos dados obtidos na TAB. 13, é possível observar que em nenhuma das amostras é alcançado a tensão máxima de ruptura igual ou superior a 2,1Mpa aos 7 dias de idade, conforme estabelece a ABNT NBR 12253 – Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento (ABNT, 2012 c). Logo, para análise de variação de compressão simples o solo é denominado melhorado e não estabilizado. Este resultado deve-se ao fato que a amostra onde foi empregado o percentual de 3% de cimento, trata-se de um solo classificado segundo o sistema H.R.B. como um solo A2-7, que ainda segundo a ABNT NBR 12253 (ABNT, 2012 c), para alcançar um solo dito estabilizado necessitaria de percentual mínimo igual a 7% em relação ao peso seco do solo. De maneira análoga, a amostra na qual foi dissolvido 3% de cal em relação ao peso seco do solo, segundo as recomendações do trabalho de Cristelo (2001), necessitaria para atingir resistência referida como de um solo estabilizado, o percentual de 4%.

Quando avaliado os resultados dos solos em seu estado natural, através dos GRAF. 8 e 9, nota-se que, o solo arenoso possui maior resistência inicial comparado ao solo argiloso. Entretanto, quando incorporado cimento ao solo arenoso e cal ao solo argiloso, verifica-se que para o mesmo teor de aditivo e idade de cura, o solo argiloso com adição de cal apresenta maior variação de resistência se comparado ao solo arenoso com adição de cimento. Este fato justifica-se pelo teor necessário para estabilização de um solo arenoso com cimento demandar mais aditivo para aglomerar as partículas de solo, que um solo argiloso estabilizado com cal; que em concentrações menores reage de forma efetiva com as partículas de solo, evitando a ocorrência da carbonatação das partículas de cal, que diminui a ação cimentante das partículas e desta forma o acréscimo de resistência.

Verificou-se nos resultados ilustrados nos GRAF. 10 e 11, que para ambas amostras de solo com presença do estabilizante líquido, quando comparado a amostra de solo natural e ao solo reagindo com cimento ou cal, obtiveram neste programa experimental ganho expressivo de resistência com o acréscimo dos teores de estabilizante líquido incorporado aos solos, o que sugere que o produto ainda não alcançou o limite máximo de saturação para o desenvolvimento de resistência mecânica.

Notou-se ainda, que, nos teores de estabilizante líquido 1:2000 e 1:2500 a variação de resistência equiparada ao solo natural das amostras de solo argiloso apresentaram maior acréscimo de resistência. Tal fato difere do teor de estatizante líquido a 1:1500, onde o solo arenoso apresentou melhor desempenho comparado com o solo natural, além de ser verificado a média de resistência mais alta obtida em todas as misturas.

Em relação às variações de resistência entre as misturas contendo estabilizante líquido comparadas ao solo reagindo exclusivamente com cimento ou cal, verificou-se que, no teor de 1:2500 de estabilizante líquido houve maior índice de variação de resistência no solo argiloso. Entretanto nos teores de 1:2000 e 1:1500 o solo arenoso desempenhou melhor comportamento, atingindo valores de resistência mais elevados.

6.3 Análise comparativa de custo

A análise comparativa de custo faz-se necessária uma vez que, permite avaliar a viabilidade de um processo, além das vantagens na variação de resistência apresentadas pelos solos e facilidade no processo executivo, pois procura-se constantemente técnicas que propiciem resultados satisfatórios com custo cada vez menor. É apresentado na TAB. 14 o custo unitário para as condições do ensaio de compressão simples utilizando aditivos.

Tabela 14 – Custo Unitário

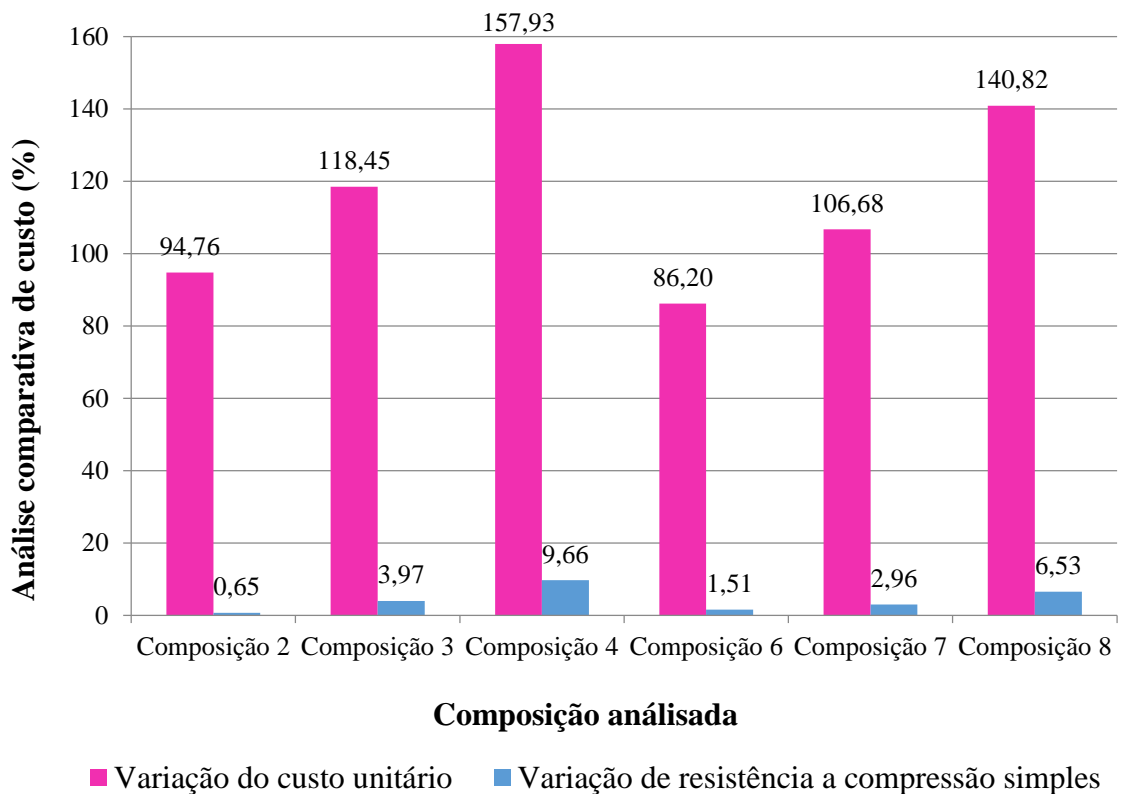
Composição analisada	Descrição	Custo Unitário (R\$)
Composição 1	Solo arenoso + 3% cimento	35,89
Composição 2	Solo arenoso + 3% cimento + Estabilizante Líquido 1:2500	69,90
Composição 3	Solo arenoso + 3% cimento + Estabilizante Líquido 1:2000	78,40
Composição 4	Solo arenoso + 3% cimento + Estabilizante Líquido 1:1500	92,57
Composição 5	Solo argiloso + 3% cal	37,34
Composição 6	Solo argiloso + 3% cal + Estabilizante Líquido 1:2500	69,52
Composição 7	Solo argiloso + 3% cal + Estabilizante Líquido 1:2000	77,17
Composição 8	Solo argiloso + 3% cal + Estabilizante Líquido 1:1500	89,91

Fonte: A autora (2018)

Verificou-se na TAB. 14, que a adição do estabilizante líquido nas misturas, resultou em elevação expressiva do custo unitário a medida que os teores foram ampliados. Isto é associado sobretudo ao custo de aquisição do produto, visto que, o processo executivo do solo melhorado com cimento ou cal possuem sistemáticas executiva semelhantes. Mesmo nos casos dos solos muito plásticos, que demandam repulverização da camada após 24 horas, que representa custo desprezível em relação ao custo de aquisição do estabilizante líquido.

Para melhor investigação dos resultados é expresso em porcentagem no GRAF. 12, a variação do custo unitário de 1 m³ de solo com presença de estabilizante líquido industrial reagindo com cimento ou cal equiparado ao mesmo solo e teor de reagente agindo exclusivamente sob o mesmo, além das respectivas resistências aferidas.

Gráfico 12 – Análise comparativa de custo



Fonte: A autora (2018)

A partir dos dados mostrados no GRAF. 12, constatou-se que, o solo arenoso apresentou maior expressão no custo unitário, resultantes do peso específico superior comparado ao solo argiloso, que para efeito de custo representam importância relevante, já que, a quantidade empregada dos aditivos é estipulada em função do peso seco do solo.

Nota-se ainda que, o solo com características arenosas reagindo com cimento e estabilizante líquido no teor de 1:2500 apresentou o maior custo por unidade de resistência alcançada no programa experimental. Em contrapartida, o mesmo solo reagindo com cimento e estabilizante líquido no teor de 1:1500 exibiu o menor custo por unidade de resistência. Desta forma, verifica-se que, custo unitário do solo arenoso não sucedeu de forma linear com o desenvolvimento de resistência mecânica. Avaliando os resultados obtidos para o solo predominantemente argiloso, observa-se que, apesar do mesmo apresentar média de resistência inferior, exibiu variação do custo unitário considerada uniforme em relação ao desenvolvimento de resistência mecânica, quando equiparado ao solo arenoso.

7 CONCLUSÃO

Através da análise dos resultados obtidos verificou-se que, a amostra de solo 1 é composta de areia e silte, sendo classificada segundo o sistema H.R.B. e U.S.C. como uma areia-argilosa, assim como o solo 2 é avaliado como um solo predominantemente argiloso. Em relação aos resultados dos ensaios de compressão simples, ambas as amostras de solo mostraram-se reativas aos aditivos empregados, apesar da limitada variação de resistência mecânica alcançada pelos solos.

A pesquisa apontou ainda, crescimento no índice de resistência mecânica ao passo que os teores de estabilizante líquido industrial se elevaram, entretanto, pode-se constatar que, nenhuma das condições de ensaio testadas apresentaram resistência mínima de 2,1MPa aos sete dias de idade. Posto isto, é importante ressaltar que, mesmo no teor de 1:1500 reagindo com cimento ou cal a 3% em relação ao peso seco do solos, recomendados pelo fabricante do estabilizante líquido industrial, que representam a maior dosagem testada, não correspondem a proporção máxima que equilibre ou resulte na saturação do aditivos e conseqüentemente decréscimo dos índices de resistência mecânica. Indicando que as dosagens adotadas para ambos estabilizantes químicos, são insuficientes para proporcionar estabilidade ao solo, contemplando um solo simplesmente melhorado.

Em virtude da restrita variação de resistência mecânica alcançada, comparado a outras técnicas já normatizadas, visando estabilizar solos, admite-se que, o custo para desenvolvimento da média de resistência mecânica dos solos adicionando estabilizante líquido industrial, além de não ser proporcional ao acréscimo de resistência, é considerado relativamente alto para desenvolvimento desta propriedade e portanto não contempla custo-benefício satisfatório.

REFERÊNCIAS

ARRIVABENI, B. S. **Alternativas para estabilização granulométrica e química de solo de estradas florestais**. 2017. 53p. Dissertação (Pós-graduação em Magister Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das misturas de solo-cimento**: Normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo: ABCP, 1986. 63 p. (ET-35).

_____. **Guia básico da utilização do cimento Portland**. São Paulo: ABCP, 2002. 28 p. (BT-106).

_____. **O solo-cimento e suas aplicações rurais**. São Paulo: ABCP, 1996. 21 p. (BT-117).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024**: Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2012 a. 6p.

_____. **NBR 12025**: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012 b. 2p.

_____. **NBR 12253**: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2012 c. 3p.

_____. **NBR 6457**: Amostras de solos – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016 a. 8p.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016 b. 5p.

_____. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18p.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016 c. 3p.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2017.12p.

AZEVÊDO, A. L. C. **Estabilização de solos com adição de cal**: Um estudo sobre a reversibilidade das reações que acontece no solo após a adição de cal. 2010. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BLACKBOARD. **Resistência dos solos ao cisalhamento. Notas de aula da disciplina EADG264**.2018. Disponível em: <https://iesb.blackboard.com/bbcswebdav/institution/Ead/_disciplinas/EADG264/nova/aula22.html>. Acesso em: 15 abril 2018.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações v. 1: fundamentos**. 6. ed. reimp. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 248p.

CRAIG, R. F. **Craig mecânica dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 365p.

CRISPIM, F. A. **Compactação de solos**: Influência de métodos e de parâmetros de compactação na estrutura de solos. 2007. 77p. Dissertação (Pós-graduação em Magister Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

CRISTELO, N. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. 2001. Dissertação (Mestrado em Estruturas, Geotécnica e Fundações) – Universidade do Minho, Braga, 2001.

CRUZ, M. L.; JALALI, S. Melhoramento do desempenho de misturas de solo-cimento com recurso a ativadores de baixo custo. **Revista Luso-Brasileira de Geotécnia**, v. 10, n. 120, p. 49-64, nov. 2010.

DAS, B. M. **Fundamento em engenharia geotécnica**. Tradução da 6.ed. americana. São Paulo: Thomson, 2007. 562p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 3. ed. São Carlos: LDiBe Editora, 2017. 1246p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Manual de Pavimentação**. 2. ed. Rio de Janeiro: Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, Divisão de Capacitação Tecnológica. 1996. 320p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de Pavimentação**. 3.ed. Rio de Janeiro: Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisas, Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2006. 274p.

_____. **Sistema de custos referenciais de obras. Custo unitário referência**. Minas Gerais. Maio/2018. 6074p. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/sicro/sudeste/minas-gerais/2018/maio/maio-2018>>. Acesso em: 19 setembro 2018.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas**: aplicações na estabilidade de taludes. 2. ed. Curitiba: UFPR, 2009.

FERRAZ, R. L. **Contribuição ao estudo da estabilização de solos para fins rodoviários e habitacionais**. 1994. 174p. Dissertação (Mestrado em Magister Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

FRANÇA, F. C. **Estabilização química de solos para fins rodoviários**: Estudo de caso com o produto “RBI Grade 81”. 2003. 99p. Tese (Pós-graduação em Magister Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

GANDOLFI, G. G.; CARDOSO, L. S. **Estudo da estabilização química do tipo solo**: Emulsão em solo tropical laterítico granular utilizado em obras de pavimentação. 2013. 80p. Monografia (Graduação de bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

GORSKI, C. M. F. M. **Estabilização de solos argilosos com ligante hidráulico LIPIDUR DS**. 2010. 92p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Ambiente) – Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2010.

HILÁRIO, R. Q. **Uso de Pavimento reciclado adicionado com cimento para uso como reforço de base para rodovias**: Estudo de caso: BR: 120. 2016. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2.ed. São Paulo: Oficinas de Textos, 2010.

LOPES, W. G. R. **Solo-cimento reforçado com bambu**: Características físico- mecânicas. 2002. 158p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2002.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotranferência para a densidade do solo máxima. **Revista Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.33, n. 02, p. 349-354, 2011.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2005. 574p.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos solos**. São Carlos: USP, 1988. 197p.

ORÇAFASCIO, S. E. **Sistema de custos e orçamentos 40375**: Estabilização solo-cimento 3% peso pista. 2015. Software. Disponível em: <<https://www.orcafascio.com/>>. Acesso em: 10 setembro 2018.

OLIVEIRA, E. **Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão**: Estudo de caso no Município de Ribeirão das Neves/MG. 2010. 171p. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**: com exercícios resolvidos em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367p.

PORTELINHA, F. H. M. **Efeito da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários**: Mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica. 2008. 161p. Dissertação (Mestrado em Magister Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

RIBEIRO, R. A. V. **Avaliação do desempenho hidráulico de barreiras de proteção ambiental produzidas com solo laterítico arenoso compactado, estabilizado quimicamente**. 2002. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

SARTORI, G. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão**. 2015. 54p. Monografia (Graduação de bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.

SILVA, C. C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos**. 2007. 157p. Dissertação (Pós-graduação em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: PINI, 2001. 671p.

SOUZA, J. S. **Mecânica dos solos**. Brasília: NT Editora, 2015. 14-22p.

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Classificação de solos: U.S.C.**

Disponível em:

<http://www.cct.udesc.br/arquivos/id_submenu/1470/classificacao_U.S.C._2017.pdf>.

Acesso em: 24 março 2018.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1977. 509p.