



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Monografia

Contribuição para o Uso de Argilas Orgânicas de Elevada Plasticidade na Construção de Estradas

Autor: Danilo Jossias Pedro Garrine

Supervisor: Prof. Doutor Carlos Quadros

Maputo, Fevereiro de 2022



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Contribuição para o Uso de Argilas Orgânicas de Elevada Plasticidade na Construção de Estradas

Monografia apresentada a Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil como requisito final para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Civil

Autor: Danilo Jossias Pedro Garrine

Supervisor: Prof. Doutor Carlos Quadros

Maputo, Fevereiro de 2022

DECLARAÇÃO SOB PALAVRA DE HONRA

Declaração Sob Palavra de Honra

Declaro por minha honra que a presente Monografia é produto da minha própria investigação, com recurso a bibliografia e referências indicadas ao longo do texto, e que não foi submetido para a obtenção de outro grau que não seja o de Licenciatura em Engenharia Civil pela Universidade Eduardo Mondlane.

Maputo, Fevereiro de 2022

O Autor

Danilo Jossias Pedro Garrine

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais que fizeram de tudo e mais um pouco para que chegasse ao fim desta etapa. Não há palavras para expressar a tanta gratidão que tenho por eles, no mínimo queria endereçar o meu muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Deus, por me dedicar saúde e por tudo que tem surgido na minha caminhada.

Em segundo lugar, ao meu supervisor Prof. Carlos Quadros, por me ter concedido a oportunidade de realizar os ensaios laboratoriais na Roadlab, pelo conhecimento transmitido desde os tempos de carteira e pelo contributo no enriquecimento deste trabalho através das suas inteligentes sugestões. Igualmente agradeço a co-supervisora Eng. Olga Honchar e a todos os colaboradores da Roadlab pelo apoio, conselhos, encorajamento e transmissão de conhecimento técnico.

Aos meus colegas de turma de 2016, em especial Mussual e Patson.

Ao Hans que, directa ou indirectamente contribuiu para o melhoramento deste trabalho, o meu muito obrigado.

RESUMO

As argilas orgânicas de elevada plasticidade apresentam numerosos problemas em obras de estradas devido à sua baixa capacidade de suporte de carga e alto nível de alterações volumétricas resultantes da variação do teor de humidade. Esta pesquisa pretende, avaliar a possibilidade do uso de argilas orgânicas de elevada plasticidade em obras de estradas.

O confinamento do solo em sacos tem se apresentado à engenharia geotécnica como um recurso capaz de dar resposta a três questões fundamentais: ecologia, economia e eficiência. Com efeito, esta técnica de tratamento de solos apresenta resultados satisfatórios do ponto de vista técnico, evita os impactos ambientais inerentes à utilização dos materiais tradicionais, rentabiliza custos de obra e prazos de execução.

Nesse sentido, procurou-se seleccionar duas amostras de solo na via de acesso a praia de Macaneta e procedeu-se a uma caracterização laboratorial. Essa caracterização compreendeu a caracterização física e mecânica, dos solos no seu estado natural.

A amostra DG2 apresentou um valor de CBR inferior a 3%. Com vista a incrementar o seu valor de CBR, a amostra foi seca ao ar e posteriormente foi confinada em sacos plásticos estando no teor de humidade ótimo e no teor de humidade próximo ao limite de plasticidade ($\pm 2\%$ de margem), respectivamente. Com a amostra DG2 confinada em sacos plásticos procedeu-se a caracterização mecânica através do ensaio CBR adaptado. Quando a amostra DG2 foi compactada no teor de humidade ótimo o valor de CBR variou de 1.7% para 6.7% sem e com o confinamento em sacos plásticos, respectivamente. Quando a amostra DG2 foi compactada no teor de humidade próximo do limite de plasticidade o CBR do solo confinado em sacos plásticos foi de 5.3%.

Os resultados dos ensaios laboratoriais indicaram uma melhoria significativa no valor de CBR com o confinamento da argila orgânica de elevada plasticidade em sacos plásticos, o que permite o seu uso no corpo do aterro em obras de estradas.

No presente trabalho também apresenta-se casos de obras e ensaios realizados com o confinamento do solo em sacos.

Palavra-chave: Argilas orgânicas de elevada plasticidade, confinamento do solo em sacos plásticos, CBR adaptado.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJECTIVOS DA PESQUISA	2
1.2.1. OBJECTIVO GERAL	2
1.2.2. OBJECTIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	3
1.4. JUSTIFICATIVA	3
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1. SOLOS ARGILOSOS	5
2.2. PROPRIEDADES GERAIS DOS SOLOS ARGILOSOS	5
2.2.1. GRANULOMETRIA	6
2.2.2. LIMITES DE CONSISTÊNCIA	6
2.3. PROBLEMAS ASSOCIADOS AOS SOLOS ARGILOSOS	7
2.4. CRITÉRIOS DE ACEITABILIDADE DE SOLOS ARGILOSOS PARA O USO EM ATERROS	9
2.5. MÉTODOS DE TRATAMENTO DE SOLOS ARGILOSOS	11
2.5.1. REALINHAMENTO	12
2.5.2. ESCAVAÇÃO E SUBSTITUIÇÃO DE SOLO	12
2.5.3. ESTABILIZAÇÃO DO SOLO	12
2.5.4. ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA	13
2.5.5. ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA	14
2.5.5.1. Estabilização Solo - Cal	15
2.5.6. MÉTODO DE CONTROLO DE HUMIDADE	16
2.5.7. ESTABILIZAÇÃO FÍSICA	16
2.5.7.1. <i>Soilbag</i>	16
2.5.7.2. Princípio de reforço de solo usando <i>soilbag</i>	18
2.5.7.2. Aplicações práticas de <i>soilbag</i>	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1. MATERIAIS	25
3.1.1. SOLO	25
3.1.2. ÁGUA	25
3.1.3. SACOS PLÁSTICOS E FITA-COLA	25
3.2. MÉTODOS	26
3.2.1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	26
3.2.2. TRABALHO DE CAMPO	26
3.2.2.1. Trabalho de colheita de amostra	28

3.3. ENSAIOS LABORATORIAIS	31
3.3.1. SOLO	31
3.3.1.1. ENSAIO DE GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO	32
3.3.1.2. LIMITES DE ATTERBERG	32
3.3.1.2.1. Limite de liquidez	33
3.3.1.3. ENSAIO DE RETRACÇÃO LINEAR	33
3.3.1.4. LIMITE DE PLASTICIDADE	34
3.3.1.5. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	34
3.3.1.6. ENSAIO CBR	35
3.3.2. SACOS PLÁSTICOS	35
3.3.2.1. Ensaio CBR adaptado	35
a) Aparelhos e utensílios	35
b) Procedimento do ensaio	36
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	39
4.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E LIMITES DE ATTERBERG	39
4.2. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	40
4.3. ENSAIO CBR	41
4.4. ENSAIO CBR ADAPTADO	42
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	44
5.1. CONCLUSÕES	44
5.2. RECOMENDAÇÕES	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
ANEXO 1 - DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE NATURAL	A1
ANEXO 2 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	A2
ANEXO 3 - DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE CONSISTÊNCIA E RETRACÇÃO LINEAR	A4
ANEXO 4 - DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE ÓPTIMO E DA DENSIDADE SECA MÁXIMA	A8
ANEXO 5 - DETERMINAÇÃO DO CBR DA AMOSTRA IMERSA POR 4 DIAS	A10
ANEXO 6 - DETERMINAÇÃO DO CBR MODIFICADO DO SACO PLÁSTICO PREENCHIDO COM AMOSTRA DG2	A13

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ASTM - American Society for Testing and Materials

AASHTO – American Association of State Highways Officials

°C – Grau Celsius

CBR – *Califórnia Bearing Ratio*

cm – Centimetro

in situ Do latim – directamente no local

et al. Do latim – *et alii*

g - Grama

IP- Índice de plasticidade

Kg – Quilograma

LL- Limite de liquidez

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LP- Limite de plasticidade

m - Metro

ml - Mililitro

mm - Milímetro

kPa – Quilopascal

kN – Quilonewton

SATCC – Southern Africa Transport and Communications Commission

TMH – Technical Method for Highways

USCS - Unified Soil Classification System

µm - Micrometro

w- Teor de humidade

Wótimo – Teor de humidade ótimo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Definição dos limites de consistência. Fonte: Adaptado de (Sataloff et al., 2013).....	7
Figura 2: Deslizamento do material de aterro da estrada caracterizado por solos de elevada plasticidade.	8
Figura 3: Aterro constituído por solo de elevada plasticidade com médio potencial de expansão no corpo do aterro, solo não expansivo no espaldar, na parte superior e na parte inferior do aterro. Fonte: Adaptado de (Zheng et al., 2009).....	10
Figura 4: Aterro constituído por solo de elevada plasticidade com médio potencial de expansão no corpo do aterro, solo não expansivo na parte superior do aterro e reforçado com geogrelha no espaldar. Fonte: Adaptado de (Zheng et al., 2009).	11
Figura 5: Aterro constituído pela mistura de solo de elevada plasticidade e cascalho no corpo do aterro, solo não expansivo na parte superior do aterro e reforçado com geogrelha no espaldar. Fonte: Adaptado de (Zheng <i>et al.</i> , 2009).....	11
Figura 6: Princípio de reforço do solo expansivo com <i>soilbag</i> . Fonte: Adaptado de (Liu, 2013).....	19
Figura 7: Local de construção do método de construção <i>soilbag</i> (vista em planta). Fonte: Adaptado de (Nomoto & Matsuoka, 2015).	21
Figura 8: Esboço do método do ensaio CBR incluindo <i>soilbag</i> : (a) Método de preparação da amostra, (b) Situação correspondente ao momento da realização do ensaio CBR. Fonte: Adaptado de (Daito et al., 2012).	24
Figura 9: Curvas granulométricas das amostras DG1 e DG2	39
Figura 10: Curvas de compactação das amostras DG1 e DG2	40
Figura 11: Gráfico CBR - teor de humidade dos sacos plásticos preenchidos com a amostra DG2	43
Figura 12: Curva de fluidez para determinação do limite de liquidez da amostra DG1	4
Figura 13: Curva de fluidez para determinação do limite de liquidez da amostra DG2	6
Figura 14: Curva carga – penetração da amostra DG1 para as diferentes energias de compactação	10
Figura 15: Curva carga – penetração da amostra DG2 para as diferentes energias de compactação	12
Figura 16: Curva carga – penetração do saco plástico preenchido com a amostra DG2 no $W_{ótimo} = 21\%$	13

Figura 17: Curva carga – penetração do saco plástico preenchido com a amostra DG2
no w= 38%14

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1: Construção de uma rodovia em uma lagoa preenchida com soilbag: (a) Estado inicial da lagoa; (b) Compactação da fundação reforçada por soilbag com um compactador de rolo vibratório. Fonte: (Xue et al., 2008).	20
Foto 2: Bitola-guia em <i>soilbag</i> : (a) Bitola-guia de plástico (canto superior direito da foto) e conexão nos quatro lados do saco (canto inferior esquerdo da foto); (b) Colocação de <i>soilbags</i> conectados por uma bitola-guia. Fonte: (Nomoto & Matsuoka, 2015).	21
Foto 3: <i>Soilbag</i> : (a) Superfície superior do <i>soilbag</i> , (b) Compactação do <i>soilbag</i> com um compactador pneumático. Fonte: (Nomoto & Matsuoka, 2015).	22
Foto 4: Ensaio de carga em placa na fundação não perturbada e com reforço:	23
Foto 5: Mapa dos principais solos e rios em Maputo. Fonte: Quantum GIS 3.2.1	26
Foto 6: Estado da via de acesso a praia de Macaneta durante o período chuvoso (Dezembro de 2020). Fonte: Autor	27
Foto 7: Condições do leito do local de colheita da amostra DG2 durante o período seco (Janeiro de 2021). Fonte: Autor	27
Foto 8: Local de Colheita da amostra DG1. Fonte: Google Earth.....	28
Foto 9: Local de Colheita da amostra DG2. Fonte: Google Earth.....	28
Foto 10: Poço de colheita das amostras: (a) poço da amostra DG1 e (b) poço da amostra DG2. Fonte: Autor	29
Foto 11: Amostra remexida: (a) amostra DG1 e (b) amostra DG2. Fonte: Autor	30
Foto 12: Série de peneiros. Fonte: Autor	32
Foto 13: Mistura solo-água durante a realização do ensaio de limite de liquidez.	33
Foto 14: Recipiente rectangular contendo calha de retracção e cápsulas usadas para determinar os limites de Atterberg após secagem em estufa. Fonte: Autor.....	33
Foto 15: Amosta de solo no limite plástico	34
Foto 16: Remoção do material excedente: (a) corte do material de projecção e (b) material nivelado com o topo do molde. Fonte: Autor.	34
Foto 17: Realização do ensaio de CBR. Fonte: Autor.	35
Foto 18: Activação do pistão sobre o maciço do molde que foi colocado sobre o material contido no molde. Fonte: Autor	37
Foto 19: Superfície do molde ápos o ensaio CBR adaptado. Fonte: Autor	38

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Quantidade necessária para cada uma das amostras remexidas	29
Tabela 2: Ensaio laboratoriais	30
Tabela 3: Limites de Atterberg das amostras	40
Tabela 4: Resultado do valor CBR da amostra DG1 para as diferentes energias de compactação	41
Tabela 5: Resultado do valor da expansão da amostra DG1 para as diferentes energias de compactação.....	41
Tabela 6: Resultado do valor CBR da amostra DG2 para as diferentes energias de compactação	41
Tabela 7: Resultado do valor da expansão da amostra DG2 para as diferentes energias de compactação.....	41
Tabela 8: Resultado do valor CBR para os sacos preenchidos com a amostra DG2	42
Tabela 9: Resultado do valor CBR para os sacos preenchidos com a amostra DG2	42
Tabela 10: Determinação do teor de humidade natural da amostra DG1	1
Tabela 11: Determinação do teor de humidade natural da amostra DG2	1
Tabela 12: Análise granulométrica da amostra DG1 retida do peneiro nº 200 após lavagem e secagem em estufa	2
Tabela 13: Análise granulométrica da amostra DG2 retida do peneiro nº 200 após lavagem e secagem em estufa	3
Tabela 14: Determinação do limite de liquidez da amostra DG1	4
Tabela 15: Determinação do limite de plasticidade da amostra DG1	5
Tabela 16: Determinação da retracção linear da amostra DG1	5
Tabela 17: Determinação do limite de liquidez da amostra DG2	6
Tabela 18: Determinação do limite de plasticidade da amostra DG1.....	7
Tabela 19: Determinação da retracção linear da amostra DG2	7
Tabela 20: Determinação da densidade seca máxima e teor de humidade óptimo a amostra DG1	8
Tabela 21: Determinação da densidade seca máxima e teor de humidade óptimo a amostra DG2	9
Tabela 22: Leitura da carga de penetração na prensa (kN) da amostra DG1	10
Tabela 23: Determinação da densidade seca da amostra DG1	11
Tabela 24: Leitura da carga de penetração na prensa (kN) da amostra DG2	11
Tabela 25: Determinação da densidade seca da amostra DG2.....	12

Tabela 26: Leitura da carga de penetração na prensa (kN) do saco preenchido com a amostra DG2 no $w_{ótimo} = 21\%$	13
Tabela 27: Leitura da carga de penetração na prensa (kN) do saco preenchido com a amostra DG2 no $w = 38\%$	14

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A estrutura do pavimento de uma estrada apoia-se directamente sobre o solo, razão pela qual é imprescindível a correcta realização da investigação geotécnica do local, a fim de se ter conhecimento suficiente sobre as características geotécnicas, comportamento e possíveis métodos de tratamento para os solos a serem usados como material de aterro na construção de estradas.

O sucesso, a segurança e a economia a longo prazo da estrutura do pavimento dependem fortemente do solo subjacente (Silva, 2010), bem como da interacção entre os minerais do solo e a água durante e após a construção (Faezehossadat e Jeff, 2016). A qualidade do subleito e do material de aterro tem grande influência na construção e na vida útil do pavimento (Magdi, 2014).

As condições das infra-estruturas rodoviárias nas áreas rurais de países em desenvolvimento são subdesenvolvidas, principalmente em áreas constituídas por solos locais caracterizados como argila de elevada plasticidade, causando um declínio significativo nos meios de subsistência e nas funções económicas destas zonas em particular e do país em geral. A selecção do método de tratamento adequado para os solos argilosos de elevada plasticidade geralmente resulta de um estudo económico (Azzo, 2009). Com vista a minimizar o custo de construção é necessário usar materiais potencialmente rentáveis e disponíveis localmente. Por outro lado, a necessidade de se encontrar um equilíbrio adequado entre qualidade e custo não deve ser negligenciada (Chhachffla, 2015).

Nos últimos anos, extensos estudos foram realizados, e muitos outros métodos foram propostos para o tratamento de solos argilosos de elevada plasticidade, um dos quais é o uso do método de construção *soilbag* (saco preenchido com solo).

O método de construção *soilbag* tem sido usado há muito tempo na construção de aterros em tempos de inundação e como estruturas temporárias durante a reconstrução após desastres naturais. Nos últimos anos também tem sido usado em obras de construção e manutenção de estradas com vista a reforçar o solo local (Kimura, 2012).

No presente trabalho, a determinação da capacidade de suporte de uma camada de aterro constituída por um conjunto de sacos plásticos preenchidos com argilas orgânicas de elevada plasticidade é introduzida pela primeira vez e, uma série de ensaios laboratoriais foram realizados em amostras de solo colhidas ao longo do troço da via de acesso a Praia de Macanete com vista a estudar as suas propriedades físicas e mecânicas.

1.2. Objectivos da pesquisa

1.2.1. Objectivo geral

A presente pesquisa tem por objectivo avaliar a possibilidade do uso de argilas orgânicas de elevada plasticidade como material de aterro na construção de estradas.

1.2.2. Objectivos específicos

Os principais objectivos específicos da pesquisa são:

- a)** Apresentar conceitos sobre solos argilosos e as suas respectivas propriedades gerais;
- b)** Descrever os problemas associados aos solos argilosos;
- c)** Identificar os critérios de aceitabilidade de solos argilosos de elevada plasticidade como material de aterro em obras de estradas;
- d)** Descrever os métodos de tratamento de solos argilosos de elevada plasticidade;
- e)** Realizar a caracterização física e mecânica de amostras de solo em laboratório;
- f)** Avaliar a capacidade de suporte de carga de um conjunto de sacos plásticos, preenchidos com argilas orgânicas de elevada plasticidade, através do ensaio CBR adaptado.

1.3. Formulação do problema

Geralmente, argilas orgânicas de elevada plasticidade são encontradas em zonas baixas e muitos são os casos em que aterros relativamente altos são imprescindíveis para elevar o nível da estrada. Netes casos, projetar pavimentos económicos com desempenhos satisfatórios tem sido um grande desafio, pois solos caracterizados por seu comportamento plástico muitas vezes não fornecem capacidade de suporte de carga necessária para atingir desempenhos aceitáveis sob acção da carga de tráfego e as demandas ambientais. Embora, o desempenho destes solos sob acção de carga seja aceitável durante a estação seca do ano, o solo não experimenta o mesmo desempenho durante a estação chuvosa. Em geral, os solos argilosos de elevada plasticidade não causariam problemas durante o ciclo de vida do projecto de uma estrada se a sua humidade permanecesse constante neste período, todavia, como resultado das variações sazonais de humidade nestes solos é inevitável a ocorrência de assentamentos e rotura prematura do pavimento, evidenciadas por ondulações, fissuras, depressões, saliências, irregularidades, deformações e outras degradações que afectam as condições de circulação e obrigam, a acções de manutenção mais ou menos frequentes. Neste âmbito, a presente pesquisa desenrolar-se-á com intuito de responder à seguinte pergunta: **Será que as argilas orgânicas de elevada plasticidade, colhidas no troço da via de acesso a Praia de Macaneta, podem ser usadas como material de aterro em obras de construção de estradas?**

1.4. Justificativa

Dada a escassez de solos locais que possuem propriedades que atendam as especificações das normas vigentes de construção de camadas de aterro em obras de estradas, em decorrência da crise que tem assolado o país, tem se verificado a inviabilidade da melhoria e/ou construção de vias de acesso, pois um custo elevado seria imprescindível para remover o solo local, comprar e transportar material da câmara de empréstimo para o local da construção com vista a substituir o solo local. Este custo, em termos de finanças, recursos e tempo, pode, no entanto, ser reduzido simplesmente fazendo o uso do solo local. Mediante os factos acima descritos o presente trabalho foi desenvolvido com vista a avaliar a possibilidade do uso de solos argilosos de elevada plasticidade na construção de estradas e, para este efeito foi

investigada a capacidade de suporte de carga de um conjunto de sacos plásticos preenchidos com argilas orgânicas de elevada plasticidade.

1.5. Estrutura do trabalho

O trabalho comporta cinco capítulos com os conteúdos que se apresentam nos parágrafos seguintes.

O primeiro capítulo, o capítulo introdutório, onde se refere os objectivos do trabalho, a formulação do problema, a justificativa e a estrutura do trabalho, descrevendo a forma como o mesmo foi estruturado e resumindo os conteúdos desenvolvidos em cada um dos cinco capítulos seguintes.

O segundo capítulo corresponde a revisão da literatura, onde se abordam os aspectos relacionados aos solos argilosos, a saber: as suas propriedades geotécnicas, os problemas associados aos solos argilosos e os seus respectivos métodos de tratamento.

O terceiro capítulo marca o início da parte prática deste estudo. Nele descreve-se a metodologia utilizada para a realização do presente trabalho, igualmente, define-se os objectivos de cada ensaio realizado, justifica-se a escolha do local de estudo, apresenta-se os materiais e procedimentos utilizados para a realização do ensaio CBR adaptado.

O quarto capítulo corresponde a apresentação e análise dos resultados dos ensaios apresentados no capítulo anterior.

Finalmente, o quinto capítulo corresponde às conclusões do trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Solos argilosos

O termo “argila” permite vários entendimentos que surgem da formação profissional, técnica ou científica das várias entidades que por ela se interessam – geólogos, pedólogos, agrónomos, químicos, mineralogistas, ceramistas, etc. quer seja pela sua génese, pelas suas propriedades ou pelas suas aplicações. Assim, destacam-se os seguintes: Na perspectiva de (Silva, 2013), para um ceramista, o termo argila representa um material natural que quando misturado com água, se converte numa pasta plástica.

No entendimento de (Meira, 2001), para um sedimentologista, é um termo granulométrico que abrange todos os sedimentos em que dominam as partículas com diâmetro equivalente a $2\mu\text{m}$.

Segundo (Silva, 2013) o petrologista considera que a argila é uma rocha com comportamento friável, com minerais muito finos não observáveis à vista desarmada, e um mineralogista define argila como sendo um mineral ou mistura de minerais argilosos que apresentam granulometria muito fina.

(Meira, 2001) acrescenta ainda que, o conceito mais frequente e com maior aceitação, considera a argila um produto natural, terroso, constituído por componentes de grão muito fino, que consistem, fundamentalmente, em minerais argilosos. Em meio húmido, este produto natural desenvolve plasticidade e endurece depois de seco.

2.2. Propriedades gerais dos solos argilosos

As argilas são materiais bastante heterogêneos, cujas características dependem da formação geológica e da localização da extracção. Devido à sua plasticidade, a argila é facilmente manipulada quando húmida e apresenta elevada resistência após a secagem, por isso é um dos bens minerais mais utilizados pela humanidade, desde os tempos mais remotos até à actualidade.

Para além de ser necessário entender o conceito e a génese dos minerais que constituem os solos argilosos, é essencial o conhecimento das suas propriedades físicas, de forma a possibilitar a avaliação do seu comportamento, nomeadamente quando aplicados em obra.

Pelo interesse e utilidade que terão no desenvolvimento deste trabalho, seguidamente serão descritas as propriedades das argilas mais relevantes para o presente estudo.

2.2.1. Granulometria

No entendimento de (Meira, 2001) as argilas são materiais geológicos finamente divididos. Os filossilicatos seus constituintes têm cristais de pequeníssimas dimensões, em regra com diâmetro esférico equivalente inferior a 2 μm . A granulometria é uma das características mais importantes destes minerais e que dominam muitas das suas propriedades.

2.2.2. Limites de consistência

Na perspectiva de (Cunha, 2012), para a caracterização dos solos de textura fina, os ensaios de granulometria não são suficientes, pois as suas propriedades plásticas dependem essencialmente do teor de água, além da forma das partículas e da sua composição química e mineralógica. A presença de água nos solos finos pode afectar significativamente o seu comportamento de engenharia e, portanto, é necessário o conhecimento desses índices de referência que mostram e evidenciam esses efeitos.

(Das, 2007) acrescenta ainda que, dependendo do teor de humidade o comportamento do solo pode ser dividido em sólido, semi-sólido, plástico e líquido. Ao estado físico do solo dá-se o nome de consistência e os limites inferiores e superiores do teor de água para cada estado do solo são designados por limites de consistência.

Segundo (Barnes, 2016), no estado plástico, o solo apresenta uma propriedade denominada plasticidade, que representa a maior ou menor capacidade do solo ser moldado (ou deformar-se) sob certas condições de humidade, sem entrar em rotura e sem variação de volume, (Machado & Machado, 1997) acrescentam ainda que, a manifestação desta propriedade num solo depende essencialmente dos seguintes factores:

(a) Humidade: Existe uma faixa de humidade dentro da qual o solo se comporta de forma plástica. Para valores inferiores, o solo comporta-se como semi-sólido ou sólido, e para maiores teores de água, o solo comporta-se como um líquido.

b) Tipo de argilomineral: As propriedades que caracterizam cada tipo de argilomineral são: forma, constituição mineralógica, tamanho, superfície específica, etc., influenciam o comportamento plástico do solo. Assim, quanto maior a superfície específica, maior a plasticidade do solo.

Desta forma, a avaliação das características de plasticidade de um solo fino, nomeadamente dos seus limites de plasticidade e de liquidez, é determinante para a correcta previsão dos aspectos fundamentais do seu comportamento.

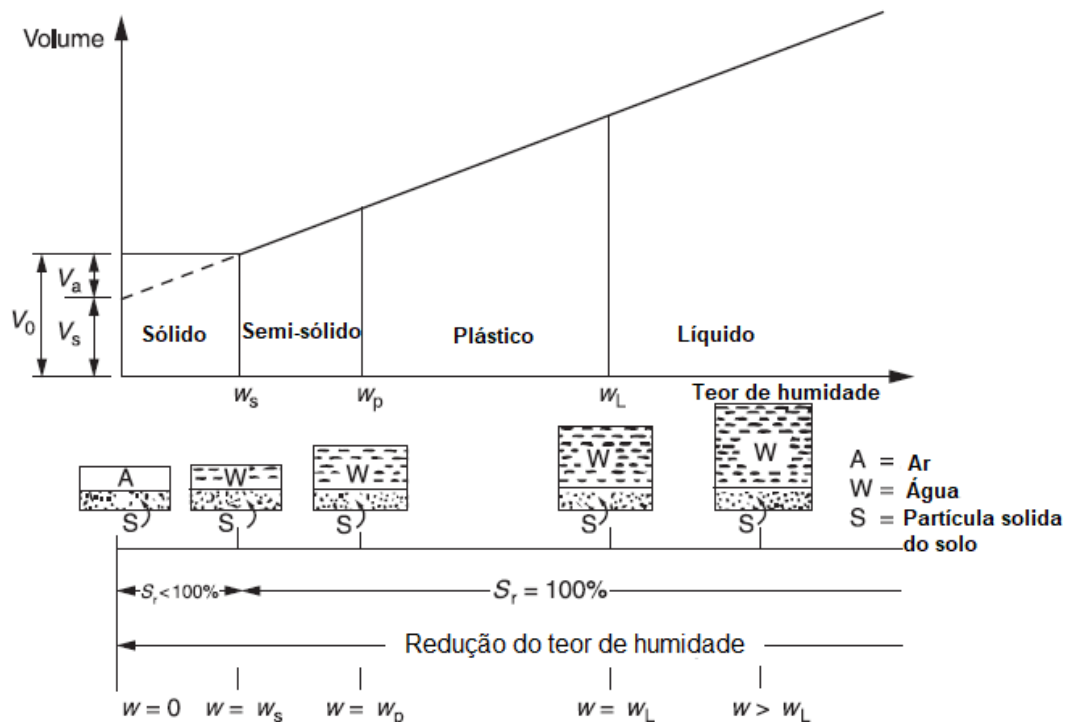


Figura 1: Definição dos limites de consistência. Fonte: Adaptado de (Sataloff *et al.*, 2013).

2.3. Problemas associados aos solos argilosos

No entendimento de (Elsharif & Sumaya, 2001; Faezehossadat & Jeff, 2016) e (Santos, 2011) as características que afetam o desempenho de pavimentos apoiados sobre solos argilosos são:

a) Capacidade de carga

Geralmente, solos argilosos de elevada plasticidade apresentam valores de CBR muito baixos quando totalmente saturados, valores tão baixos quanto 2% são comuns. Nestes casos o solo é, portanto, caracterizado como subleito pobre e precisa de algum tipo de tratamento.

b) Resistência ao cisalhamento

Quando uma estrada é construída por cima de um aterro de grandes dimensões, caracterizado pelo seu comportamento plástico, em geral, a resistência ao cisalhamento do material do aterro é baixa (insuficiente), conforme ilustrado na figura 2. Nestes casos, a rotura por deslizamento pode ocorrer devido à baixa capacidade de carga do aterro.

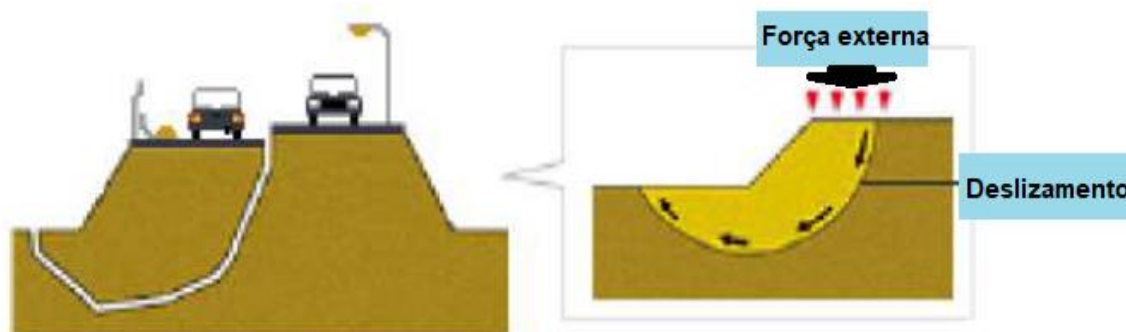


Figura 2: Deslizamento do material de aterro da estrada caracterizado por solos de elevada plasticidade.

c) Potencial de expansão

Os solos argilosos de elevada plasticidade, em geral, apresentam médio a alto potencial de expansão, principalmente quando sujeitos a cargas leves, como é o caso das cargas transmitidas ao solo pelo pavimento e pelas ações da carga do tráfego.

A carga de tráfego é transitória e móvel ao longo do pavimento, portanto, não é eficaz para equilibrar a pressão de expansão do solo.

d) Assentamentos

Certos solos argilosos, em particular os que no seu estado natural ocorrem com teor em água e índice de vazios elevados, apresentam compressibilidade muito acentuada. Estando os solos saturados e submetidos a um carregamento estes experimentam uma significativa redução de volume que ocorre à medida que a água é expulsa do solo. Essa expulsão é tipicamente demorada devido ao facto de serem solos muito pouco permeáveis, pelo que as deformações volumétricas, que implicam assentamentos da superfície do terreno, estendem-se por períodos de tempo muito dilatados. Esta propensão de certos maciços argilosos de exibirem deformações volumétricas muito

elevadas que demoram longo tempo a processar-se, tem acarretado grandes dificuldades às construções de estradas.

2.4. Critérios de aceitabilidade de solos argilosos para o uso em aterros

A especificação técnica da China para a construção de rodovias (CMOC, 1996a) estipula que solos argilosos de elevada plasticidade com alto potencial de expansão não devem ser usados como material de aterro devido à sua fraca estabilidade à água. Todavia, os solos argilosos de elevada plasticidade com médio potencial de expansão podem ser usados como material de aterro somente após o seu devido tratamento e os solos argilosos de elevada plasticidade com baixo potencial de expansão podem ser usados como material de aterro de acordo com o clima, condições hidrológicas e a classificação da rodovia, mas tendo em consideração que o espaldar e a parte superior do aterro devem ser constituídos por material não sensível a humidade (Yue *et al.*, 2002).

Baseados nas especificações vigentes como a SATCC, TRH14, entre outros, muitos projectistas recomendam o uso de materiais seleccionados com valor de CBR maior que 15% na parte inferior do aterro, no espaldar e na fundação do pavimento.

Os materiais a usar na construção da parte inferior dos aterros devem ser preferencialmente insensíveis à água, especialmente quando houver possibilidade de inundação e/ou de encharcamento dos terrenos adjacentes. Na construção do corpo dos aterros devem ser utilizados materiais que garantam e assegurem por um lado a estabilidade da obra, e simultaneamente, que as deformações pós-construtivas que se venham a verificar sejam toleráveis a curto e longo prazo para as condições de serviço. Na parte superior dos aterros e no leito do pavimento (fundação do pavimento) devem ser utilizados materiais de melhor qualidade, os materiais devem ter um valor de CBR maior que 15% principalmente para reduzir a espessura das camadas de sub-base e/ou base.

De acordo com (Elsharif & Sumaya, 2001), as seguintes técnicas de tratamento de solos argilosos de elevada plasticidade foram sugeridas e executadas com sucesso por projectistas de estradas no Sudão, a saber:

(a) O CBR do material do aterro deve ser maior que 5% e os materiais seleccionados devem ser usados quando o material do subleito tiver um valor de CBR menor que 5%. Recomenda-se o uso de solos não sensíveis a humidade na parte superior do aterro

quando o valor de CBR do material do aterro for inferior a 8%. O material a colocar na parte superior do aterro pode ser constituído por camadas de areia vermelha, areia estabilizada com cimento, etc. É digno de nota mencionar que não é recomendável o uso de areia pedregosa ou argila estabilizada mecanicamente.

(b) Em muitos casos, o CBR do subleito é inferior a 4% e nenhum material local com melhores propriedades está disponível nas proximidades. Nestes casos, recomenda-se que o corpo do aterro seja construído com solos locais existentes nas proximidades e seja revestido na parte superior, na parte inferior e no espaldar do aterro com materiais não sensíveis a água e/ou reforçando no espaldar com materiais geossintéticos, conforme ilustrado nas figuras 3,4 e 5.

(Jae,1995) e (Martins, 2018) acrescentam ainda que, é admissível que o corpo do aterro seja constituído por argilas orgânicas de elevada plasticidade (OH) desde que o valor de CBR seja igual ou superior a 3%.

Na mesma ordem de ideia que várias especificações Brasileira consultadas, a especificação técnica da Agência Goiana de Transportes e Obras recomenda que os solos utilizados para o corpo do aterro devem ter valor de CBR igual ou superior a 2% e uma expansão menor que 4%.

Nota: Unidades em metros

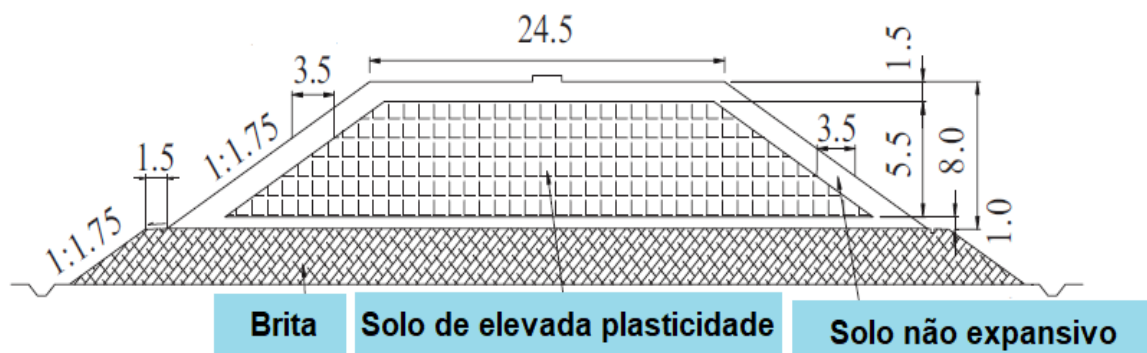


Figura 3: Aterro constituído por solo de elevada plasticidade com médio potencial de expansão no corpo do aterro, solo não expansivo no espaldar, na parte superior e na parte inferior do aterro. Fonte: Adaptado de (Zheng *et al.*, 2009).

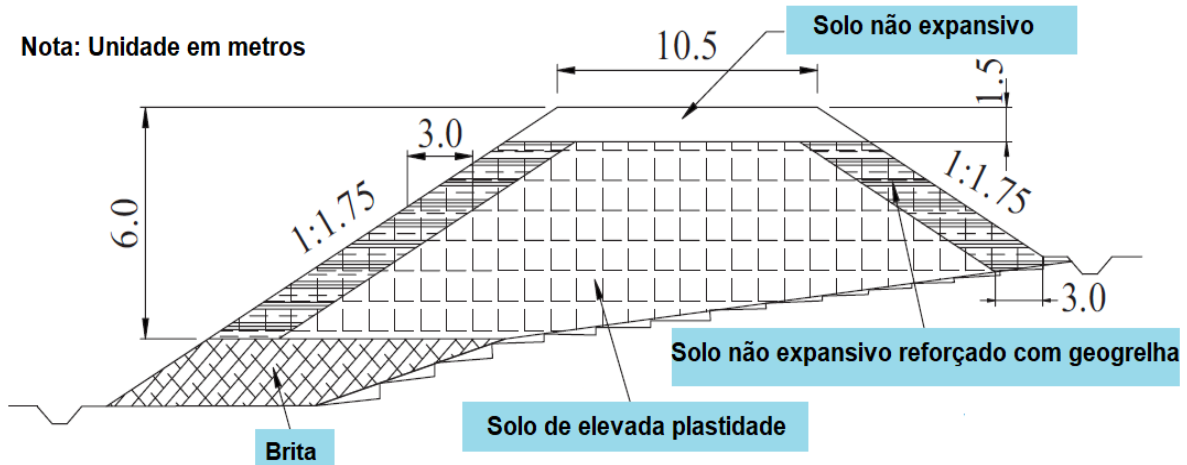


Figura 4: Aterro constituído por solo de elevada plasticidade com médio potencial de expansão no corpo do aterro, solo não expansivo na parte superior do aterro e reforçado com geogrelha no espaldar. Fonte: Adaptado de (Zheng *et al.*, 2009).

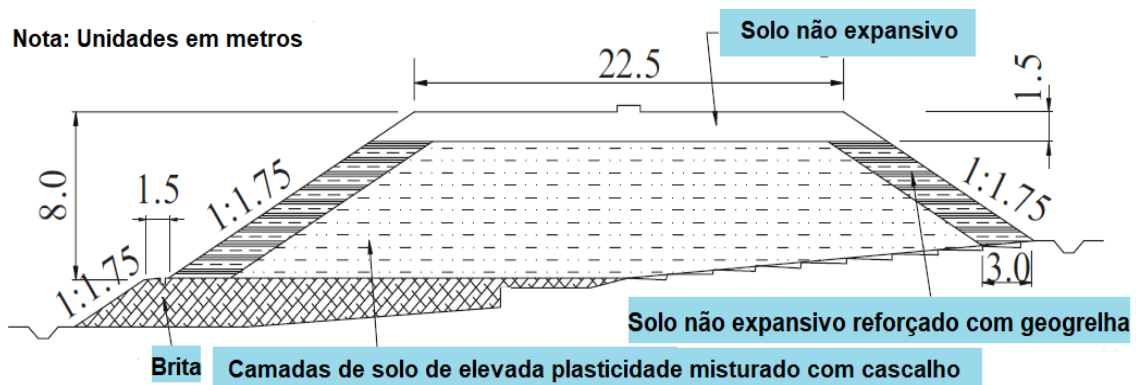


Figura 5: Aterro constituído pela mistura de solo de elevada plasticidade e cascalho no corpo do aterro, solo não expansivo na parte superior do aterro e reforçado com geogrelha no espaldar. Fonte: Adaptado de (Zheng *et al.*, 2009).

2.5. Métodos de tratamento de solos argilosos

Os métodos de estabilização de solos argilosos geralmente são agrupados em três grupos: i) mecânica; ii) química e iii) física.

Como acontece com qualquer abordagem de tratamento, em primeiro lugar é imprescindível a realização da investigação geotécnica do local, a fim de se ter conhecimento suficiente sobre as características geotécnicas do local.

Vários métodos para lidar com problemas associados aos solos argilosos de elevada plasticidade ao projectar pavimentos foram estudados, discutidos e alguns aplicados.

Os que foram considerados mais importantes para a presente pesquisa incluem:

2.5.1. Realinhamento

Esta opção só é possível se as áreas constituídas por solos argilosos de elevada plasticidade forem de extensão limitada, neste caso, o alinhamento da estrada pode ser alterado.

2.5.2. Escavação e substituição de solo

De acordo com (Hamza, 2014), esta abordagem só é economicamente viável se o material seleccionado estiver disponível nas proximidades do local da obra.

O solo seleccionado para a camada de aterro, em geral, deve ser um solo que não é sensível à água.

Ao avaliar a profundidade para a qual a expansão do solo argiloso é importante, uma série de aspectos devem ser levados em consideração:

- (a) O humedecimento uniforme do solo tende a uniformizar a sua expansão.
- (b) A profundidade de substituição do solo argiloso nunca deve ser inferior a 90 cm e de preferência 120 cm.
- (c) Não é recomendável que a profundidade de substituição esteja abaixo do lençol freático durante o período da construção.
- (d) O grau de compactação dependerá do tipo de solo usado para o aterro.

2.5.3. Estabilização do solo

A estabilização do solo envolve o uso de agentes estabilizadores (materiais ligantes) em solos para melhorar suas propriedades geotécnicas, como compressibilidade, resistência, permeabilidade e durabilidade. Os componentes da tecnologia de estabilização incluem solos e/ou minerais do solo e agente estabilizador ou aglutinantes (materiais cimentícios). A maioria das estabilizações são realizadas em solos moles (siltosos, turfa argilosa ou solos orgânicos) para alcançar propriedades de engenharia desejáveis.

De acordo com a (ASTM, 1992) existem três objectivos principais na estabilização do solo. Estes incluem o aumento da resistência do solo existente para aumentar sua

capacidade de carga, melhorar a permeabilidade e aumentar a resistência do solo ao processo de intemperismo e uso do tráfego, entre outros.

Turfas e solos orgânicos são ricos em teor de água de até cerca de 2000%, alta porosidade e alto teor orgânico. A consistência do solo turfoso pode variar de lamacento a fibroso e, na maioria dos casos, o depósito é pouco profundo, mas, no pior dos casos, pode estender-se a vários metros abaixo da superfície (Hamza, 2014).

2.5.4. Estabilização mecânica

Um dos factores, dos quais a quantidade de expansão do solo argiloso depende, é a densidade seca do solo.

A estabilização mecânica é o método mais utilizado em obras de pavimentação rodoviária. No entendimento de (Cristelo, 2001) este método consiste num conjunto de operações mecânicas que conferem ao solo estabilidade quando solicitado em pavimentos de estradas. As operações mecânicas são aquelas que modificam o arranjo das partículas do solo, ou a sua granulometria. O mecanismo mais popular neste método de estabilização é a compactação.

Tem sido recomendado que os solos argilosos de elevada plasticidade sejam compactados para uma densidade mínima, ao invés de uma densidade máxima. Compactar o solo a uma densidade baixa e um alto teor de humidade reduz o aumento do potencial expansivo do solo argiloso (Jeyapalan).

Embora não houvesse muita mudança no teor de humidade neste procedimento, a densificação ocorre quando o ar é expelido dos vazios do solo por compactação, aproximando suas partículas e tornando o solo mais resistente. Foi constatado em laboratório que diminuindo a densidade seca de solos argilosos de elevada plasticidade, o potencial de expansão pode ser reduzido sem causar efeitos adversos pela introdução de humidade excessiva no solo (Jeyapalan).

Sem o controle da densidade seca e humidade, expansões não uniformes e assentamentos podem ocorrer no solo. A eficácia da compactação também pode diminuir com o aumento do teor de finos, para uma fracção do solo menor do que 75 μm . Pois, durante a compactação, a coesão e a ligação entre as partículas interferem no rearranjo das partículas (Faezehossadat, 2016). A principal vantagem desta abordagem é que o potencial de expansão pode ser reduzido sem efeitos adversos causados pela introdução de humidade excessiva no solo.

O método de compactação também influencia as características de expansão de solos argilosos. Para um solo argiloso de elevada plasticidade com o mesmo teor de humidade e densidade seca, a expansão é maior para uma estrutura floclada do que para uma estrutura defloclada. O uso de equipamento de compactação que produz uma acção de amassamento e uma estrutura dispersa, como um rolo de pé de carneiro, apresentara melhores resultados para controlo de expansão (Jeyapalan).

A compactação em si não é útil como método de estabilização do solo, uma vez que não produz estabilidade suficiente contra expansão ou retracção do solo. No entanto, é usada principalmente em conjunto com outros métodos de tratamento de solos argilosos de elevada plasticidade, isto é, a estabilização mecânica é um complemento a outros métodos de estabilização do solo (granulométrica, química, entre outros).

2.5.5. Estabilização química

Segundo (Cristelo, 2001) na estabilização química podem ser usados vários tipos de aditivos químicos, onde as partículas do solo são aglutinadas através de reacções químicas. (Reddy *et al.*, 2015) acrescenta ainda que, as reacções químicas incluem reacções pozolânicas, capacidade de troca catiónica, carbonatação e cimentação, que influenciam predominantemente na eficácia do processo de estabilização.

De acordo com (Cristelo, 2001), a estabilização química utilizada em obras de pavimentação rodoviária recorre geralmente ao cimento, à cal e ao betume. (Reddy *et al.*, 2015) acrescenta ainda que os aditivos utilizados para a estabilização variam de produtos industrializados a resíduos industriais.

Na mesma senda (Jeyapalan) afirma que os produtos químicos correspondem ao tratamento mais amplamente usado para controlar a expansão de solos argilosos, sendo que a cal e o cimento são usados, enquanto que sais e outros compostos inorgânicos são usados em menor grau.

Podem ser usados para além dos métodos convencionais como solo-cimento e solo-cal métodos alternativos como: cinzas volantes (*fly ash*), escória de alto-forno (*blast furnace slag*), e resíduos industriais resultantes da actividade agrícola (cinza da palha de arroz, cinza da casca de amendoim, cinza da palha de cana-de-açúcar, etc.) (Santos, 2013).

2.5.5.1. Estabilização Solo - Cal

A estabilização de argilas com cal tem sido praticada na construção de estradas em muitos países. Um estudo de estabilização de solos argilosos de elevada plasticidade com cal no Sudão confirmou a viabilidade técnica do tratamento para uso como materiais de pavimentação de estradas (Elsharif & Sumaya, 2001).

O termo “cal”, no entendimento de (Silva, 2010), pode ser utilizado para designar uma variedade de produtos derivados do calcário, que apresentam características distintas conforme o fim a que se destinam.

A experiência tem demonstrado que a cal pode reagir com solos de granulometria média, moderadamente fina e fina, conduzindo a uma diminuição de plasticidade, aumento da trabalhabilidade, redução da expansibilidade e aumento da resistência. Deste modo, a introdução de cal no solo provoca por um lado acções denominadas “imediatas”, que tem lugar desde que se misturam solo com a cal, e por outras acções a “longo prazo” que prosseguem durante vários meses, ou mesmo anos, depois da aplicação do solo tratado (Neves, 2009).

2.5.5.1.1. Critérios para avaliar a viabilidade da estabilização solo-cal

As misturas de solo com cal são formadas predominantemente pelo solo, pelo que as características deste têm grande influência nas propriedades da mistura.

As características do solo podem conduzir ao sucesso ou insucesso do processo de estabilização com cal, ou pelo menos influenciar nos aspectos económicos. Sendo assim, revela-se muito importante escolher este processo de estabilização somente quando os solos forem adequados.

De acordo com (LNEC, 1974), o principal critério de avaliação da susceptibilidade do solo à estabilização com cal é a sua plasticidade. Quanto mais plástico for o solo, maiores os benefícios devidos à adição de cal.

Outra característica importante a ter em conta, especialmente quando o objectivo do tratamento consiste em melhorar as características resistentes do solo, é a percentagem de argila que o solo apresenta, uma vez que são as partículas de argila que fornecem a sílica e a alumina necessárias ao desenvolvimento das reacções pozolânicas. Nesta senda (Barnes, 2016) acrescenta que a presença de enxofre, matérias orgânicas, sulfatos, sulfetos e dióxido de carbono podem inibir o processo de estabilização da cal.

Existem vários critérios na bibliografia para avaliar a viabilidade da estabilização de um solo com cal, tais como a granulometria, limites de consistência, presença de matéria orgânica e presença de sulfatos, além das condições gerais que estes solos devem possuir. Nesta investigação, foram adoptados os critérios da *National Lime Association* americana, que sugere:

- a) Condições gerais: solos isentos de raízes, capim ou qualquer substância prejudicial à cal;
- b) Granulometria: um valor mínimo de passados no peneiro ASTM nº 200 (0.075 mm) igual ou superior a 25 %;
- c) Limites de consistência: valor do índice de plasticidade mínimo de 10%.

2.5.6. Método de controlo de humidade

No entendimento de (Hamza, 2014), o controlo da variação do teor de humidade nas camadas do pavimento pode ser realizado da seguinte forma:

- a) A camada de pavimento deve ser o mais impermeável possível, utilizando-se um revestimento betuminoso;
- b) As bermas da estrada devem ser impermeáveis com uma largura adequada e com uma inclinação de 1: 4;
- c) Os *box culverts* de drenagem não devem ser de unidades pré-fabricadas para evitar problemas associados as juntas;
- d) As valas laterais devem estar o mais distante possível do pavimento;
- e) O material para o leito e os solos circundantes da *box culvert* devem ser materiais bem compactados e não sensíveis à água.

2.5.7. Estabilização física

Procede-se à estabilização física quando se quer alterar as propriedades do solo, alterando a granulometria do solo, (Carvalho, 2011) acrescenta que existem algumas técnicas de estabilização física do solo, tais como a correcção granulométrica ou a adição de fibras (metálicas, minerais, sintéticas ou vegetais).

2.5.7.1. Soilbag

Soilbags, *Do-nou* em Japonês, são comumente usados na elevação de aterros para o controle de enchentes de rios em épocas de inundações, como estruturas temporárias

durante a reconstrução após desastres naturais. O seu desempenho foi comprovado e tem um historial de utilização para reforço de fundações de edifícios e muros de contenção (Matsuoka & Liu, 2006) e como uma tecnologia abrangente para a manutenção de estradas rurais, mantendo a competitividade de custos e padrões de qualidade de engenharia aceitáveis (Kimura & Fukubayashi, 2012).

De acordo com (Matsuoka, 2007) os *soilbags* podem ser usados como materiais permanentes em vez de temporários, através do controle da sua qualidade com vista a garantir o seu devido desempenho. Quando os *soilbags* são enterrados no solo ou revestidos com vista a bloquear a sua exposição ao sol, eles podem se tornar materiais permanentes.

No Japão, há casos em que *soilbags* foram usados como materiais de leito de estradas pavimentadas com asfalto. Os materiais usuais para os *soilbags* cujas propriedades são estáveis para resistir a ácidos e álcalis são polietileno e polipropileno.

Segundo (Kimura & Fukubayashi, 2012) os sacos são comumente usados para embalar fertilizantes, rações, sementes e safras para a sua comercialização, sendo que os sacos usuais variam de 10 a 100 kg, todavia os sacos de 20 kg são os mais usados para a manutenção de estradas, porque são fáceis de transportar e ficam bem-dispostos em termos de tamanho e peso depois dos sacos serem preenchidos com solo.

O método de construção *soilbag* possui as seguintes vantagens, a saber:

a) De acordo com (Matsuoka) os materiais de preenchimento dos sacos podem ser constituídos por vários resíduos de construção, como betão triturado, asfalto, resíduos de telhas, entre outros. Deste modo, o uso dos *soilbags* pode contribuir significativamente para mitigar o impacto dos resíduos de construção no meio ambiente, (Fukubayashi & Kimura, 2007) acrescentam ainda que, em geral, não existe nenhuma especificação em relação à qualidade do material a colocar dentro dos sacos em termos de distribuição granulométrica, teor de humidade e índice de plasticidade. Quando a base da estrada é constituída por sacos preenchidos com material granular cujo ângulo de atrito interno é alto (exemplo: pedra britada) o assentamento da superfície da estrada é reduzido. Caso se enfrente dificuldades para obter material granular, pode se usar o solo disponível localmente. Dependendo das características do solo local colocado dentro dos sacos, um volume específico de solo e tamanho de

saco devem ser definidos através de ensaios laboratoriais (ensaio de carga em placa, ensaio de resistência a tracção do saco, etc);

b) Em comparação com o aço e o betão, os materiais usados na construção com o método *soilbags* são flexíveis e amigos do ambiente, pois evita-se o uso do cimento e de agentes químicos (Matsuoka);

c) Na perspectiva de (Matsuoka & Liu, 2003) com o uso do método de construção *soilbag*, a capacidade de suporte de carga pode aumentar 5 a 10 vezes, embora exista um pequeno assentamento nas fundações reforçadas. (Matsuoka) acrescenta ainda que, um saco de polietileno comum (aproximadamente 40 cm x 40 cm x 10 cm) preenchido com pedra britada ou cascalho pode suportar uma carga de até 200 - 300 kN. Se um saco de polipropileno de alta resistência for usado, a carga de tráfego pode aumentar para 550 - 650 kN;

d) Redução da vibração induzida pelo tráfego devido à absorção da vibração pelo *soilbag* (Matsuoka);

e) Além disso, mesmo com o solo totalmente saturado e extremamente fraco, este pode ser reforçado por *soilbag* e não mostrar assentamentos significativos após o reforço. Todavia, o mesmo não aconteceria simplesmente com a colocação de pedra britada sobre a supercie do solo totalmente saturado e extremamente fraco, pois as pedras afundariam sem o confinamento com *soilbags*.

2.5.7.2. Princípio de reforço de solo usando *soilbag*

O reforço do solo com o *soilbag* é atribuído principalmente à força de tracção que ocorre ao longo do tecido do saco que é desenvolvida devido à extensão do perímetro do saco, isto é, quando uma força externa actua no *soilbag* suficientemente compactado, o material de enchimento tende a se deformar pelas laterais, por sua vez o saco restringe a deformação do material e, conseqüentemente a tensão de tracção é mobilizada ao longo do tecido do saco.

Na perspectiva de (Matsuoka, 2007), mesmo que o volume do material de enchimento seja constante, o saco é puxado no sentido de se deformar lateralmente e a tensão de tracção é mobilizada quando a forma de *soilbag* tende a ficar mais achatada, (Xu *et al.*, 2008) acrescenta ainda que a qualidade do tecido do saco afecta a eficácia do reforço. Nesta senda, dois parâmetros importantes, resistência à tracção e a deformação máxima por extensão, são usados para descrever a qualidade dos sacos.

Para um saco preenchido com solos de elevada plasticidade, a extensão do perímetro do saco não é causada apenas pela acção de forças externas, mas também pela expansão do solo durante o processo de humedecimento.

A magnitude da força de tracção mobilizada ao longo do tecido do *soilbag* não é uniforme, mas é aproximadamente constante, (Liu, 2013) acrescenta ainda que, a força de tracção que ocorre ao longo do saco aumenta o contacto entre as partículas de solo dentro do saco, resultando no aumento da força normal de contacto (N) e da força de atrito (F) entre as partículas do solo ($F = \mu N$), onde μ é o coeficiente de atrito.

A evaporação leva à retracção do solo argiloso de elevada plasticidade. Neste caso, a tensão de tracção no saco é apenas induzida pelas forças externas aplicadas.

Por analogia, as forças externas, incluindo o peso próprio da estrutura do pavimento, fortalecem as fundações reforçadas pelo método de construção *soilbag*.

Na perspectiva de (Matsuoka) o *soilbag* tem a capacidade de converter a força externa aplicada, que era considerada como acção desfavorável para as fundações, em acção favorável para as fundações devido à acção de forças de tracção que ocorre ao longo do saco.

Em geral, a capacidade de carga do *soilbag* é determinada pela resistência à tracção dos sacos, dimensões do saco e ângulo de atrito interno do material de enchimento dos sacos.

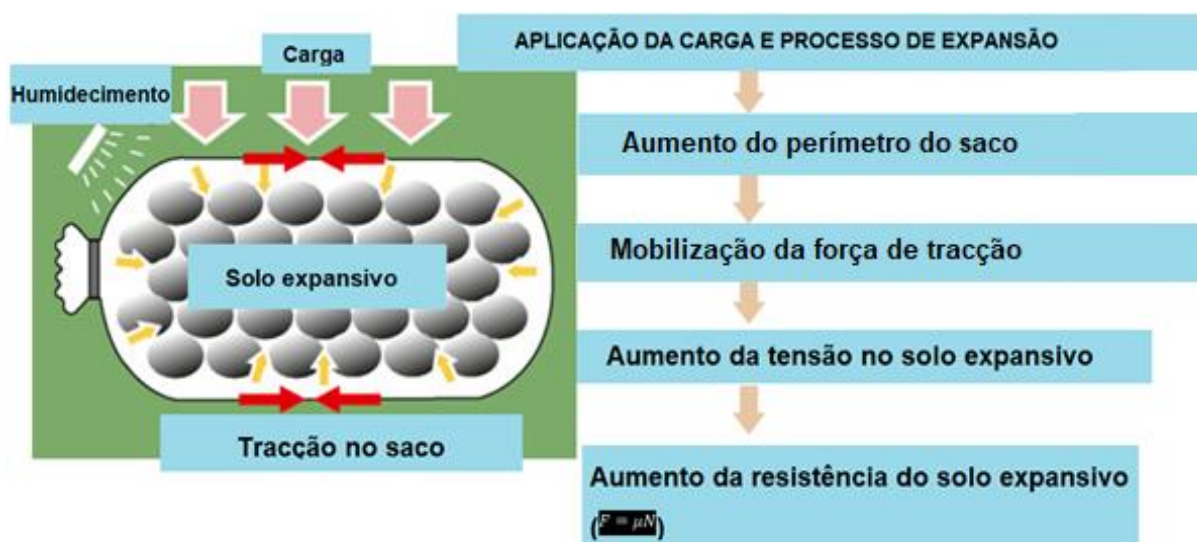


Figura 6: Princípio de reforço do solo expansivo com *soilbag*. Fonte: Adaptado de (Liu, 2013).

2.5.7.2. Aplicações práticas de *soilbag*

2.5.7.2.1. Enchimento da lagoa usando *soilbags*

Na construção de uma rodovia na província de Jiangsu, foram encontradas lagoas com fundações extremamente fracas, com o solo totalmente alagado, razão pela qual uma máquina de construção não podia passar por cima deste solo (foto1 (a)). Inicialmente a lagoa foi projectada para ser melhorada com o enchimento de pedra britada, porém, por este método ser oneroso, como alternativa sugeriu-se o uso do método de reforço do solo usando *soilbag*. Nesse caso, primeiro foi colocada sobre o solo fraco uma camada materializada por sacos preenchidos com solos naturais no teor de humidade ideal. Após o reforço usando *soilbags*, o solo fraco suportou o peso de uma máquina de construção pesada como o compactador de rolo vibratório (foto1 (b)).

A comparação do assentamento final na lagoa preenchida por *soilbags* e por brita revelou que o assentamento atingiu mais de 275 mm para o caso reforçado com pedra britada, e foi reduzido para menos de 150 mm para o caso reforçado por *soilbag*.

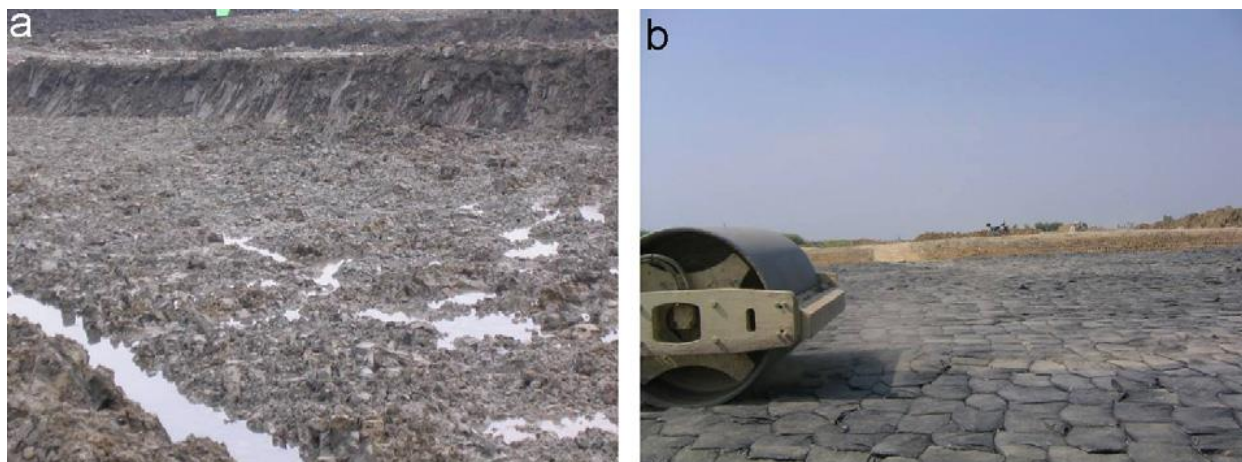


Foto 1: Construção de uma rodovia em uma lagoa preenchida com *soilbag*: (a) Estado inicial da lagoa; (b) Compactação da fundação reforçada por *soilbag* com um compactador de rolo vibratório. Fonte: (Xue *et al.*, 2008).

2.5.6.2.2. Construção de estrada em terreno pantanoso usando *soilbag*

Em uma parte da obra de construção da estrada N125, uma secção de estrada foi construída sobre um pântano (uma camada mole com uma profundidade de 3 a 4 m) correspondente a uma via com 25 m de extensão. A área sombreada (figura 7) mostra o local de construção pelo método *soilbag*. Abaixo da área sombreada, há vestígios de

pântanos e solos orgânicos. A largura de cada via é 5 m, tendo a estrada no total 11,55 m incluindo os lancis dos dois lados da via.



Figura 7: Local de construção do método de construção *soilbag* (vista em planta).

Fonte: Adaptado de (Nomoto & Matsuoka, 2015).

O método de construção *soilbag* foi usado para reforçar o solo nas áreas fracas. As dimensões da estrutura guia de calibre do *soilbag* foram de 420 mm x 420 mm x 18 mm. Com vista a deixar um espaçamento entre os sacos, o solo foi articulado com a bitola-guia, para que desta forma os sacos preenchidos com pedra britada pudessem ser instalados com precisão de acordo com os espaçamentos predeterminados. Os sacos preenchidos com pedra britada foram espaçados em um intervalo de 30 mm para dar ao saco a tensão necessária. Com o auxílio de bitola-guia foi possível conectar os sacos em todos os sentidos na direcção horizontal.

As dimensões externas dos sacos foram de 450 mm x 450 mm x 80 mm, e foram orientadas em todos os sentidos na direcção horizontal.

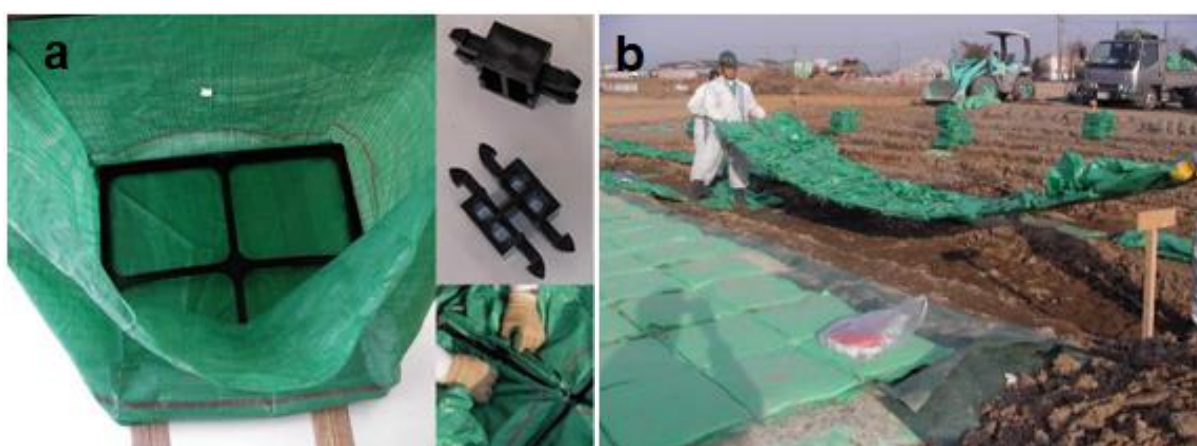


Foto 2: Bitola-guia em *soilbag*: (a) Bitola-guia de plástico (canto superior direito da foto) e conexão nos quatro lados do saco (canto inferior esquerdo da foto); (b) Colocação de *soilbags* conectados por uma bitola-guia. Fonte: (Nomoto & Matsuoka, 2015).



Foto 3: *Soilbag*: (a) Superfície superior do *soilbag*, (b) Compactação do *soilbag* com um compactador pneumático. Fonte: (Nomoto & Matsuoka, 2015).

Com base em ensaios realizados por (Nomoto & Matsuoka, 2015), foi possível obter um valor de CBR de 17,6%, o que foi considerado satisfatório pois o projecto executivo exigia um valor mínimo de CBR de 12%.

2.5.6.2.3. Reforço do solo usando *soilbag*

Como resultado de uma série de ensaios de capacidade de suporte de carga realizados por (Xu *et al.*, 2008) no âmbito do estudo do reforço do solo usando *soilbag*, foi possível constatar que a capacidade de suporte de carga do solo reforçado com *soilbag* foi 2 a 3 vezes maior do que a do solo sem *soilbag*, isto é, a capacidade de suporte de carga da fundação sem *soilbag*, com duas camadas de *soilbag* e com três camadas de *soilbag* (foto 4) foi de 70, 170 e 240 kPa, respectivamente.

Os testes de carga em placa foram realizados sobre uma fundação reforçada por sacos preenchidos com areia, cujo ângulo de atrito interno era de 33°.

O tamanho padrão dos *soilbag* será de 10 cm x 40 cm x 40 cm e o diâmetro da placa de carga era de 0,5 m.

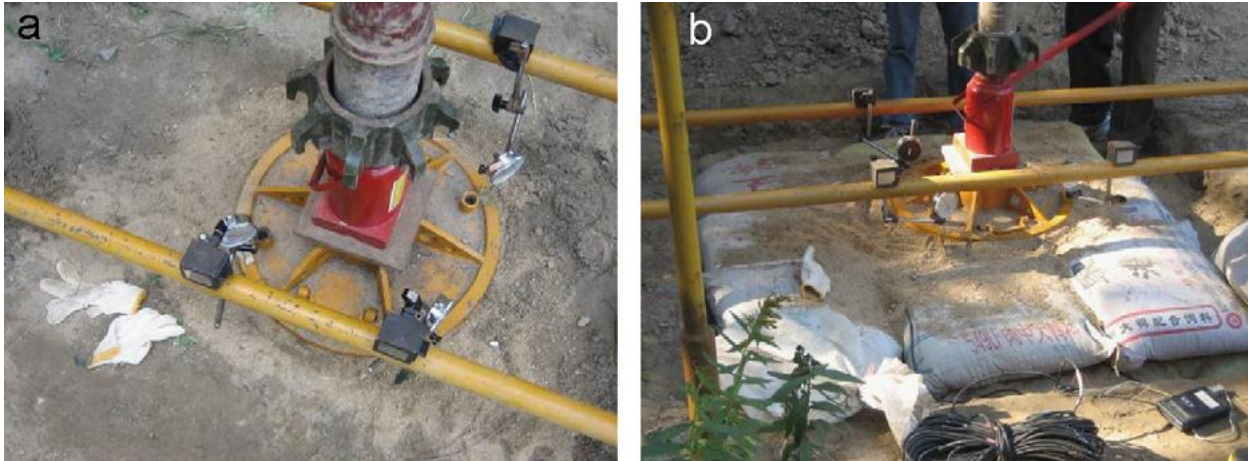


Foto 4: Ensaio de carga em placa na fundação não perturbada e com reforço:

(a) Fundação não reforçada; (b) fundação reforçada com soilbag.

Fonte: (Xu *et al.*, 2008).

2.5.6.2.4. Estudo do valor CBR do *soilbag* tendo como parâmetros o teor de água e o número de *soilbags*

De acordo com o método de classificação de solos padronizado pela Sociedade Geotécnica Japonesa, o solo usado para o estudo é classificado como argila de elevada plasticidade.

A figura 8 mostra o esboço do teste CBR incluindo *soilbag*. Um *soilbag* circular com um raio de 150 mm e uma quantidade de solo ajustada para uma altura de 42 mm após a compactação foram embalados no molde de tal forma que a superfície do *soilbag* estivesse em contacto com o disco espaçador, e foi compactado de acordo com o padronizado pela JIS A 1211-2009. Após a compactação de todas as camadas de solo com e sem *soilbag*, foi realizado o ensaio CBR (figura 8 (b)). Uma série de ensaios CBR foram realizados, portanto, assumiu-se que a espessura da camada de solo não afecta o resultado final, razão pela qual apenas uma camada com superfície de penetração CBR foi usada para representar o *soilbag*. O ensaio foi realizado com até quatro *soilbags* empilhados sobre o solo no teor de humidade natural (estado seco), e com até dois *soilbags* empilhados sobre o solo com teores de humidade inferiores e superiores ao teor de humidade ótimo.

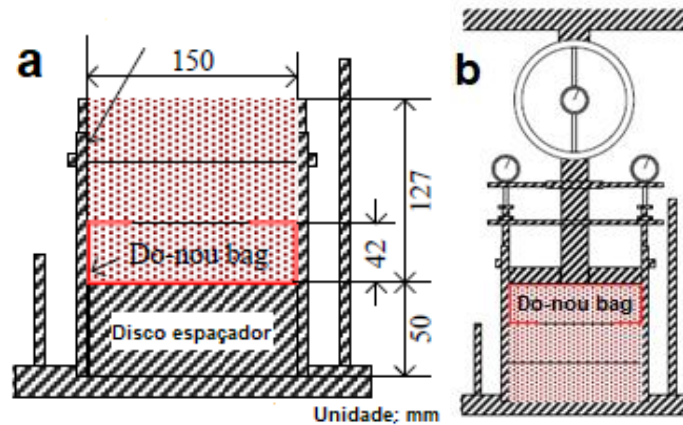


Figura 8: Esboço do método do ensaio CBR incluindo *soilbag*: (a) Método de preparação da amostra, (b) Situação correspondente ao momento da realização do ensaio CBR. Fonte: Adaptado de (Daito *et al.*, 2012).

O valor de CBR foi mais alto quando dois *soilbags* foram empilhados, neste caso o valor de CBR foi 2,3 vezes maior em relação ao solo compactado. Por outro lado, com três ou mais *soilbags*, o valor de CBR tinha a tendência de diminuir. Os ensaios subsequentes foram realizados apenas em amostras nas quais eram empilhados dois sacos preenchidos com argila.

O valor de CBR máximo foi observado no caso em que se colocou solo compactado e um *soilbag* com um teor de água de 16,5%, o valor de CBR era 1,31 vezes maior que o solo compactado. No caso em que se colocaram dois *soilbags*, o valor máximo de CBR foi observado quando o teor de água era de 8,0%, neste caso o valor CBR era 1,84 vezes maior que o do solo natural compactado. O valor de CBR foi apenas 1,1 vezes maior, mesmo com o uso de um *soilbag*, por outro lado, o valor de CBR máximo foi observado abaixo do teor de humidade ótimo. No entanto, no estado seco ($w=8\%$), quando foram usados dois *soilbags*, foi constatado um aumento de 2,3 vezes no valor de CBR.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Para a realização dos ensaios relacionados com o comportamento das amostras do solo conforme as normas vigentes (TMH1, ASTM, entre outros), foram necessários os seguintes materiais:

- (a) Solo coletado *in situ*;
- (b) Água;
- (c) Sacos plásticos e fita-cola.

3.1.1. Solo

Os materiais utilizados para a colheita de amostras do solo *in situ* foram:

- a)** Uma (1) pá manual;
- b)** Uma (1) picareta,
- c)** Uma (1) fita métrica de 7.5 m com precisão de 1mm;
- d)** Dois (2) sacos plásticos de 50kg;
- e)** Duas (2) etiquetas de papel cartão.

Para a classificação do solo foram realizados os ensaios laboratoriais necessários, nomeadamente, a análise granulométrica, e a determinação dos limites de consistência.

3.1.2. Água

A água usada para a realização dos ensaios laboratoriais era isenta de óleos, ácidos ou qualquer outra substancia que pudesse influenciar os resultados do ensaio. No entanto, a água utilizada neste trabalho foi água da rede pública pelo que todas as condições referidas se encontram asseguradas.

3.1.3. Sacos plásticos e fita-cola

Os sacos plásticos e a fita-cola utilizados para o estudo foram adquiridos no mercado formal. Em geral, foram usados sacos plásticos comuns com aproximadamente 200 mm x 100 mm x 10 mm de dimensão.

3.2. Métodos

Neste item serão apresentadas as metodologias seguidas para alcançar os objectivos do presente trabalho, assim como os ensaios que foram adoptados para a realização do trabalho.

3.2.1. Levantamento bibliográfico

Esta etapa é referente a consulta bibliográfica, onde procurou-se coleccionar e analisar as literaturas disponíveis que abordam sobre solos argilosos e os possíveis métodos de tratamento dos solos argilosos, tendo utilizando como base para o presente trabalho, livros, teses, artigos científicos, entre outros.

3.2.2. Trabalho de campo

Para a selecção dos locais de amostragem, foram realizados estudos prévios da área, utilizando o mapa produzido no programa *Quantum GIS 3.2.1*, conforme ilustrado na foto 5. O trabalho de campo consistiu essencialmente na deslocação para a via de acesso a praia de Macaneta. A selecção dos pontos de amostragem foi realizada *in situ* tendo por base as características observadas no terreno e as condições de acessibilidade, pois nas áreas de estudo tem-se verificado uma crescente dificuldade de circulação de veículo, sendo os períodos chuvosos os mais críticos (foto 6).

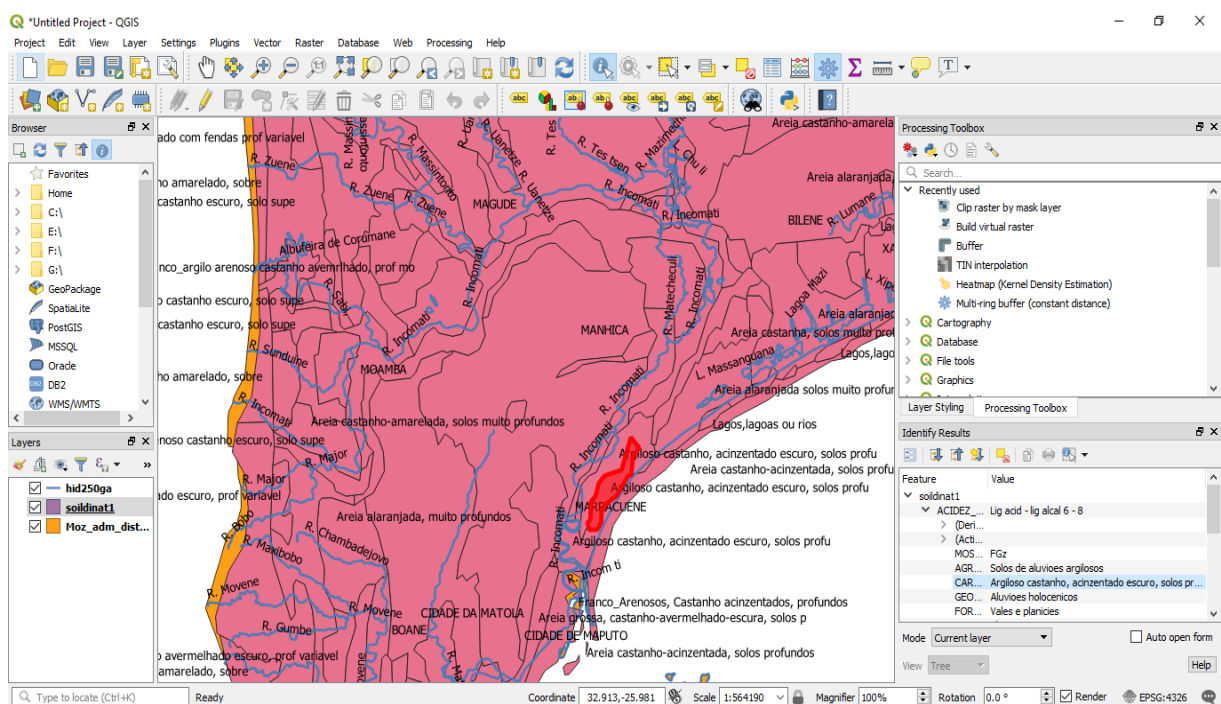


Foto 5: Mapa dos principais solos e rios em Maputo. Fonte: *Quantum GIS 3.2.1*



Foto 6: Estado da via de acesso a praia de Macaneta durante o período chuvoso (Dezembro de 2020). Fonte: Autor



Foto 7: Condições do leito do local de colheita da amostra DG2 durante o período seco (Janeiro de 2021). Fonte: Autor

3.2.2.1. Trabalho de colheita de amostra

O trabalho de campo consistiu essencialmente na colheita de amostras de solo nas áreas de estudo apresentadas nas fotos 8 e 9.



Foto 8: Local de Colheita da amostra DG1. Fonte: Google Earth

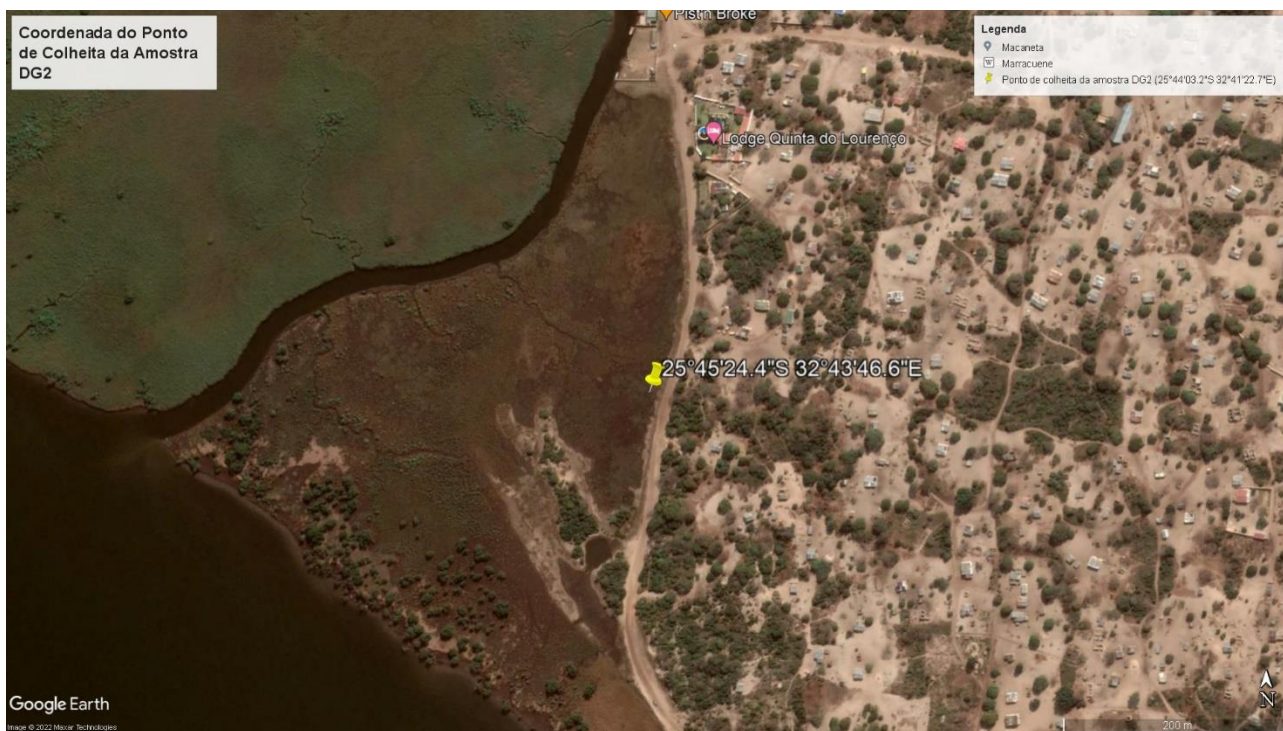


Foto 9: Local de Colheita da amostra DG2. Fonte: Google Earth

Para a amostragem foi realizada a remoção da capa superficial, muito orgânica não representativa das características das formações. A recolha das amostras foi realizada através da utilização de técnicas manuais por escavação, tendo como objectivo a recolha de amostras remexidas.

As amostras foram extraídas por escavação em poço com 1 metro de comprimento por 1 metro de largura e 0.5 metros de profundidade. Conforme ilustrado na foto 10, e posteriormente foram armazenadas em sacos plásticos.

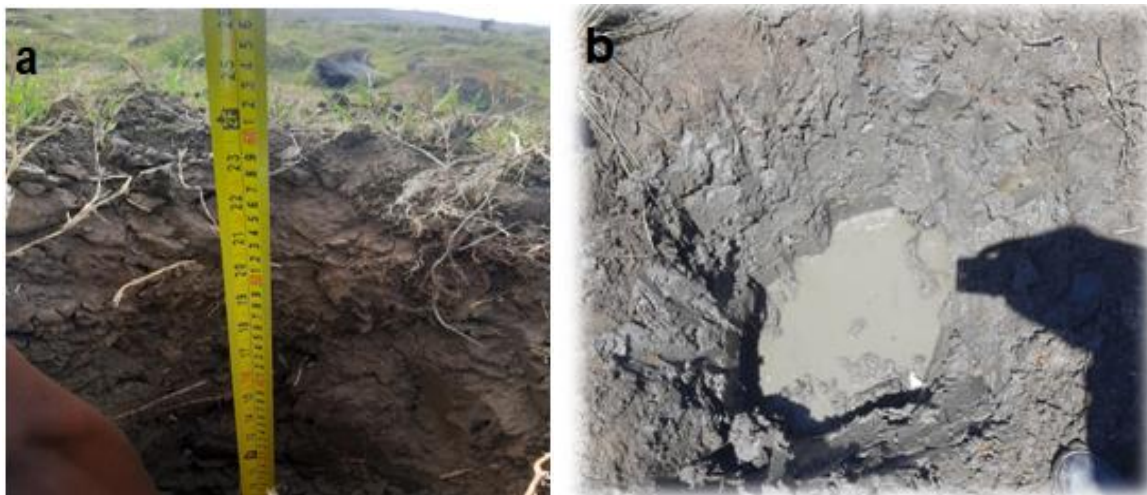


Foto 10: Poço de colheita das amostras: (a) poço da amostra DG1 e (b) poço da amostra DG2. Fonte: Autor

Para cada ponto foi colhida uma (1) amostra e cada saco foi identificado por uma etiqueta de identificação contendo as seguintes informações: número e sigla, local de colecta e data. Foi registado num caderno de informações o local de recolha das amostras, em especial as coordenadas geográficas obtidas por meio de GPS, dados sobre o tipo da amostra e as condições do tempo.

Tabela 1: Quantidade necessária para cada uma das amostras remexidas

Ensaio	Tipo	Quantidade (kg)
Caracterização	Granulometria Limite de Liquidez, Plasticidade e Retracção Linear	1
Compactação e CBR (com reuso)	Capacidade de Carga Expansibilidade	40

Fonte: Autor

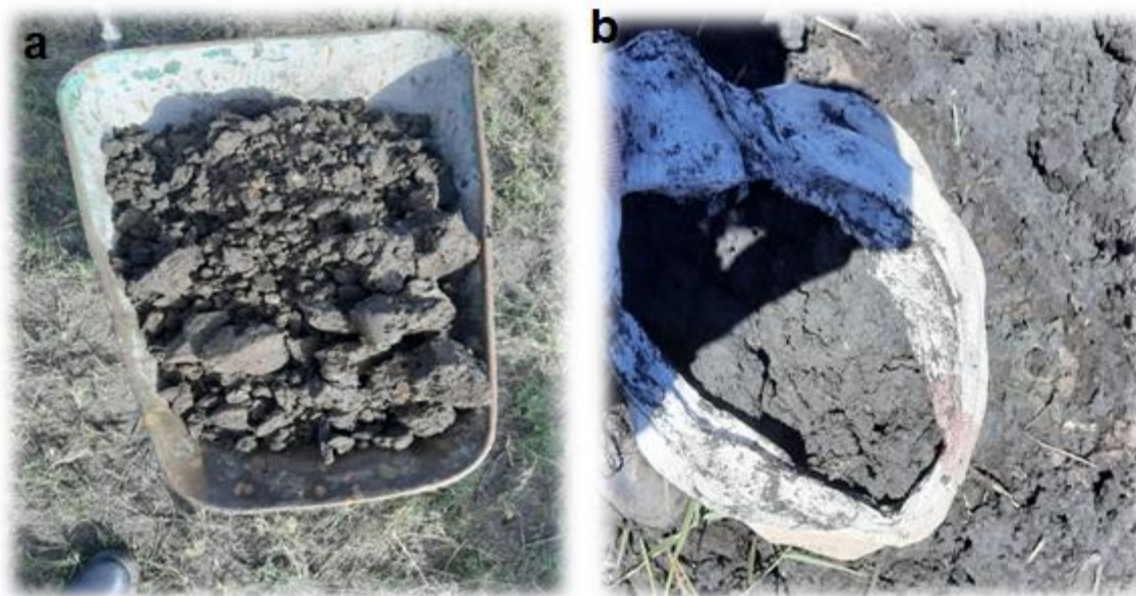


Foto 11: Amostra remexida: (a) amostra DG1 e (b) amostra DG2. Fonte: Autor

Em geral, a colheita das amostras foi realizada na base da técnica de amostragem remexida tendo como base os procedimentos preconizados na especificação NBR (9604-1986).

Após a colheita das amostras no trabalho de campo, estas foram encaminhadas ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Roadlab, onde foram realizados os ensaios com base nos procedimentos preconizados nas especificações apresentadas na tabela 2.

Tabela 2: Ensaios laboratoriais

Ensaio	Especificação
Teor de humidade natural	Método A17 da especificação TMH1
Análise granulométrica	ASTM C136
Limites de Atterberg: Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade	Método A2 da especificação TMH1 e Método A3 da especificação TMH1
Retração linear	Método A4 da especificação TMH1
Compactação	Método A7 da especificação TMH1
CBR	Método A7 da especificação TMH1 e Método A8 da especificação TMH1

3.3. Ensaio Laboratoriais

Os ensaios laboratoriais tiveram como objectivo realizar uma caracterização geotécnica das amostras, no sentido de verificar se o material por si só atende às especificações técnicas para o uso como material de aterro em obras de estrada e realizar estudos de melhoramento do valor de CBR do solo com vista a adequar as suas características geotécnicas as normas técnicas vigentes de construção de camadas de aterro em obras de estrada.

3.3.1. Solo

Com a entrada da amostra no laboratório, a amostra foi seca ao ar livre e desintegrada. A princípio, aproximadamente 100g de cada uma das amostras foi imediatamente utilizada para a determinação da humidade natural do solo *in situ*.

Antes do início dos ensaios laboratoriais as amostras foram devidamente preparadas tendo em consideração os procedimentos preconizados no método A1 da especificação TMH1, a saber:

a) Peneiramento a seco e lavagem da amostra

A amostra continha grandes pedaços de argila húmida que não podiam ser desintegrados, razão pela qual a amostra foi seca em estufa a uma temperatura não superior a 110 °C. Após a secagem na estufa, os torrões foram então desintegrados e compactados levemente aplicando pressão com o auxílio de um pilão de modo que o material passasse pela peneira de 19,0 mm. O material estava suficientemente seco para que pudesse ser peneirado no peneiro nº 200 sem entupir a peneira.

O material retido no peneiro nº 200 foi transferido para um almofariz e esfregado com um pilão com ponta de borracha, a maior parte dos agregados do solo foram desintegrados. Deste modo o material foi então peneirado novamente. O máximo possível de finos de solo foi separado dessa maneira.

O material contido no peneiro foi lavado direccionando um jacto de água sobre o material até que a água de lavagem ficasse limpa. Tratando se de um solo muito argiloso, a peneira foi colocada na água e o material na peneira foi agitado esfregando-se com os dedos na lateral da peneira, pois isso agiliza a lavagem.

Posteriormente, o material lavado foi transferido para uma forma rectangular invertendo a peneira e lavando com água. O excesso de água na forma rectangular foi despejada com cuidado e o material seco na estufa a uma temperatura de 110 °C.

Finda a preparação da amostra, prosseguiu-se com a realização dos ensaios laboratoriais.

3.3.1.1. Ensaio de granulometria por peneiramento

Com o objectivo de determinar a faixa de tamanho das partículas existentes nas amostras de solo, foi realizado o ensaio de granulometria. O conhecimento da composição granulometrica de um solo tem, nalguns casos, relevância na compreensão e previsao do seu comportamento.



Foto 12: Série de peneiros. Fonte: Autor

3.3.1.2. Limites de Atterberg

O ensaio de Limites de Atterberg tem por objectivo caracterizar os solos quanto à influência da água no seu comportamento reológico, fornecendo indicação sobre os teores de água característicos da transição de comportamento elasto-plástico para plástico (limite de plasticidade), da transição de comportamento plástico para o de líquido viscoso (limite de liquidez) e do teor de água que pode ser adicionado ao solo mantendo este volume constante (limite de retracção).

3.3.1.2.1. Limite de liquidez

Com o objectivo de obter o teor de humidade a partir do qual o solo se comporta como um líquido viscoso, foi realizado o ensaio de limite de liquidez.



Foto 13: Mistura solo-água durante a realização do ensaio de limite de liquidez.

Fonte: Autor.

3.3.1.3. Ensaio de retracção linear

Com o objectivo de determinar a redução das dimensões das amostras de solo, foi realizado o ensaio de retracção linear.



Foto 14: Recipiente rectangular contendo calha de retracção e cápsulas usadas para determinar os limites de Atterberg após secagem em estufa. Fonte: Autor

3.3.1.4. Limite de plasticidade

Com o objectivo de obter o menor teor de humidade com o qual fosse possível moldar as amostras de solo dando-lhes a forma de um cilindro de 3 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento, foi realizado o ensaio de limite de plasticidade. Este ensaio permitiu obter a fronteira entre o limite líquido e semi-sólido.

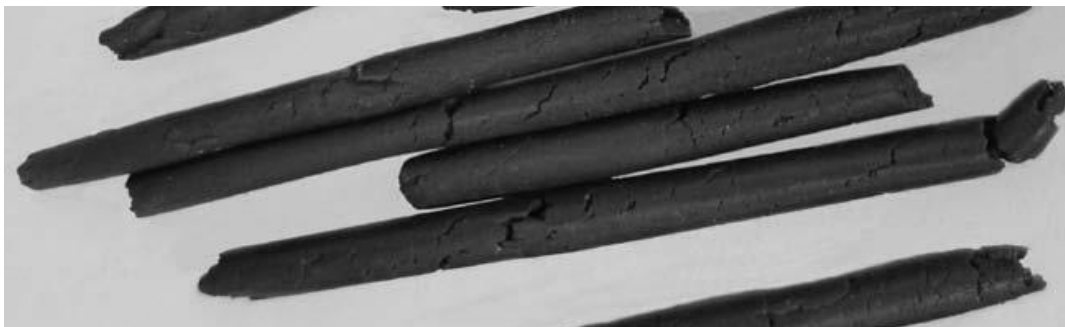


Foto 15: Amostra de solo no limite plástico

3.3.1.5. Ensaio de Compactação

Com o objectivo de determinar a baridade seca máxima e o teor de humidade óptimo das amostras de solo, de modo a se ter a melhor compactação possível, foi realizado o ensaio de compactação. Com a realização deste ensaio, determinou-se a relação entre o teor em água do solo e o peso volumico aparente seco atingido após compactação. Os parâmetros medidos neste ensaio foram: baridade seca (γ_d), baridade húmida (γ_h), e o teor de humidade ou teor de água (w).

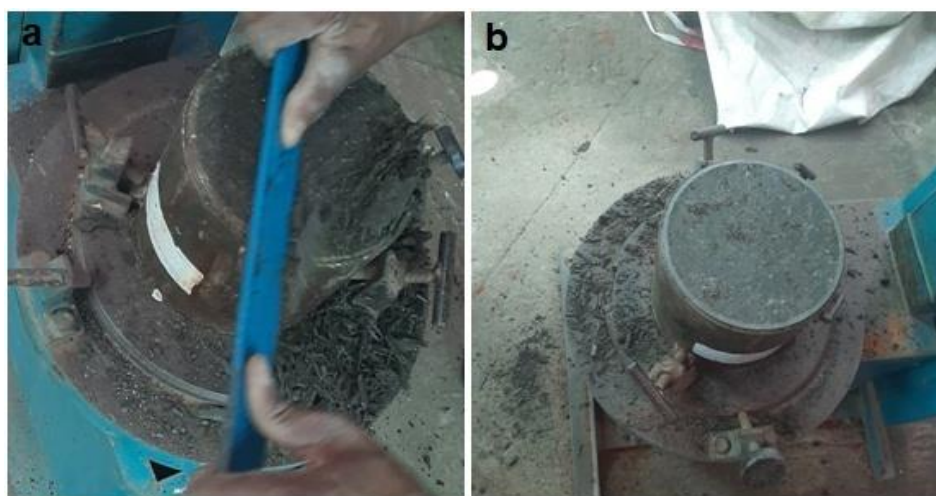


Foto 16: Remoção do material excedente: (a) corte do material de projecção e (b) material nivelado com o topo do molde. Fonte: Autor.

3.3.1.6. Ensaio CBR

Com o objectivo de determinar a capacidade de carga e a expansão das amostras de solo, foi realizado o ensaio CBR.



Foto 17: Realização do ensaio de CBR. Fonte: Autor.

3.3.2. Sacos plásticos

3.3.2.1. Ensaio CBR adaptado

Com o objectivo de determinar a capacidade de carga de um conjunto de sacos plásticos preenchidos com amostras de solo, foi realizado o ensaio de CBR adaptado.

a) Aparelhos e utensílios

Para a realização do ensaio CBR adaptado foram utilizados os seguintes aparelhos e utensílios:

- ❖ Um (1) peso anelar de 5,56 kg para uso durante a penetração;
- ❖ Um (1) molde de 152,4 mm de diâmetro, 152,4 mm de altura, com colar destacável;
- ❖ Uma (1) placa de base;
- ❖ Esquartejador;
- ❖ Duas (2) bacias com aproximadamente 350 mm de diâmetro;

- ❖ Uma (1) bacia de mistura, com aproximadamente 600 mm de comprimento, 300 mm de largura e 200 mm de altura;
- ❖ Uma (1) máquina de ensaio de compressão com capacidade de carga total de pelo menos 55 kN, registável com aproximação de 50 N e capaz de aplicar carga a uma taxa de deformação de 1,27 mm por minuto;
- ❖ Uma (1) balança para pesar até 30 kg, com precisão de 1 grama;
- ❖ Uma (1) balança para pesar até 3 kg, com precisão de 0,1 grama;
- ❖ Recipientes adequados para conter cerca de 1000 gramas de material para determinação do teor de humidade;
- ❖ Estufa, controlada termostaticamente e capaz de manter uma temperatura de 110 °C;
- ❖ Peneiros com aberturas de 4,75 mm de acordo com SABS 197;
- ❖ Um (1) compactador de aço;
- ❖ Um (1) maciço do molde;
- ❖ Baldes plásticos de água, capacidade de 1000 ml a 500 ml.

b) Procedimento do ensaio

❖ **Preparação da amostra:** A amostra de solo seca ao ar foi preparada conforme o estabelecido no Método A17 da especificação TMH1, ou seja, todo o agregado retido na peneira de 4,75 mm foi ligeiramente triturado para que pudesse passar por essa peneira. Aproximadamente 5 kg do material foi pesado.

❖ **Mistura solo-água:** Para a realização do ensaio CBR adaptado o teor de humidade dos solos confinados nos sacos plásticos foi o teor de humidade ideal e o teor de humidade próximo do limite de plasticidade do solo ($\pm 2\%$ de margem), respectivamente. Ao adicionar água, o material foi misturado continuamente com uma espátula. Após a distribuição equitativa da água no solo, uma amostra representativa foi retirada para a determinação do teor de humidade.

❖ **Determinação do teor de humidade:** Duas amostras representativas foram retiradas e colocadas em recipientes adequados para determinar o teor de humidade. As amostras foram pesadas imediatamente e secas a 110 °C.

❖ **Enchimento dos sacos:** As amostras de solo misturas com água foram acondicionadas nos sacos plásticos e, posteriormente os sacos foram selados com o auxílio de uma fita-cola.

❖ **Preenchimento do molde:** Os sacos plásticos preenchidos com a mistura de solo e água foram dispostos no interior do molde CBR e os vazios entre os sacos plásticos foram preenchidos com areia vermelha no seu teor de humidade ótimo.

❖ **Adensamento/compactação:** Os sacos dispostos no molde passaram por um processo de adensamento/compactação através da aplicação de uma carga equivalente a 4KN (por intermédio da activação da prensa sobre o maciço do molde que foi colocado sobre o material contido no molde).



Foto 18: Activação do pistão sobre o maciço do molde que foi colocado sobre o material contido no molde. Fonte: Autor

❖ **Leituras Carga vs Penetração:** O molde com os sacos plásticos compactados, foi colocado na prensa e o peso adicional de 5,56 kg foi colocado cuidadosamente em cima do material da forma mais centrada possível. O pistão foi assentado na superfície do material através do centro do peso anelar. Depois de se ligar a prensa, escolheu-se o ensaio CBR, definiu-se o modo automático e iniciou-se o ensaio, a carga foi aplicada a uma taxa uniforme de penetração de 1,27 mm por minuto. As leituras de carga foram realizadas a cada penetração de 0,635 mm, conforme registado no medidor de profundidade.



Foto 19: Superfície do molde após o ensaio CBR adaptado. Fonte: Autor

Capítulo IV

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Análise granulométrica e Limites de Atterberg

A caracterização física do solo foi realizada através dos ensaios de Granulometria por peneiramento, Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), respeitando sempre as respectivas normas vigentes (TMH1, ASTM, entre outros) para cada um dos ensaios. Com esses resultados, foi possível determinar o Índice de Plasticidade (IP) através do qual foi possível definir a classe das amostras de solo DG1 e DG2 segundo a Classificação da AASHTO e USCS.

São apresentadas as curvas granulométricas das amostras DG1 e DG2 (Figura 9):

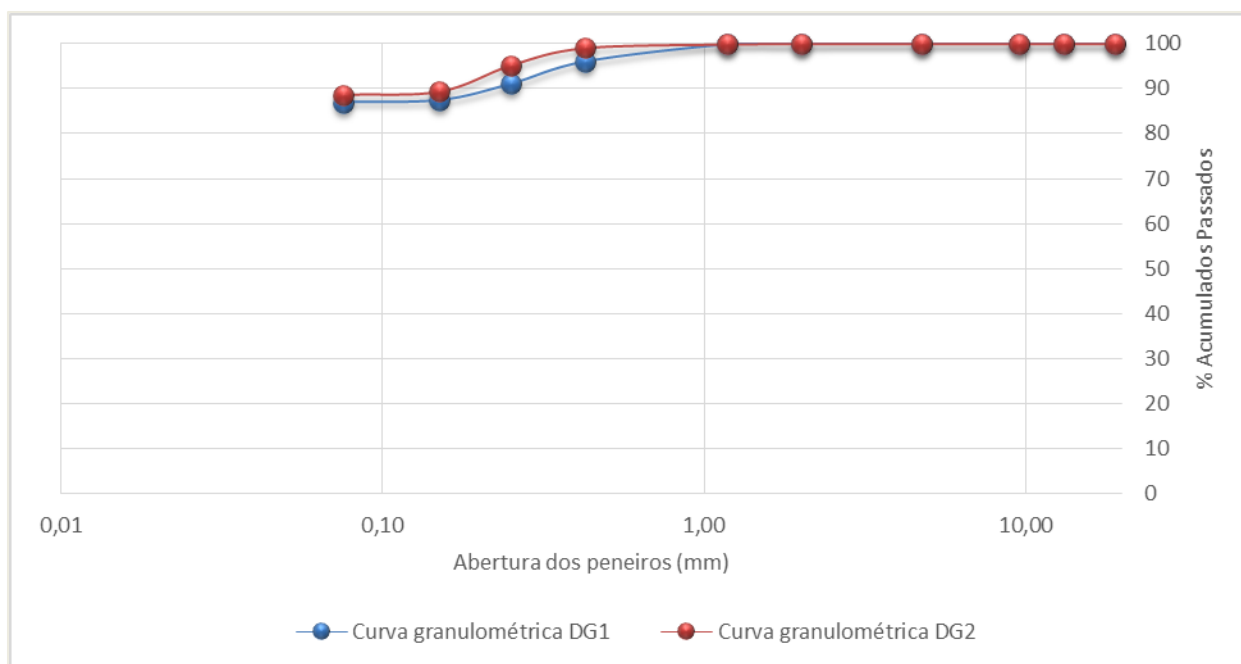


Figura 9: Curvas granulométricas das amostras DG1 e DG2

A primeira observação passível de ser feita relativamente aos resultados obtidos é a semelhança entre ambas as curvas. Esse facto é explicado pela proximidade dos locais de colheita das amostras (Figura 9).

Do traçado das curvas granulométricas pode-se verificar que a amostra DG1 apresenta cerca de 88,59% de partículas de tamanho inferior a 0,075mm, ao passo que, para a amostra DG2 essa percentagem reduz para 86,94%. A elevada percentagem da fracção de finos por sua vez proporciona ao solo as características de plasticidade verificadas nos ensaios de limites de Atterberg.

Quanto aos limites de Atterberg, os resultados são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 3: Limites de Atterberg das amostras

Amostra	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)
DG1	55.5	31.3	24.2
DG2	73.1	41.3	31.8

Quanto ao índice de plasticidade, as amostras de solo apresentam valores acima de 15%, por esta razão as amostras de solo DG1 e DG2 apresentam um comportamento altamente plástico ($IP > 15\%$).

Pela Classificação da AASTHO, ambas as amostras de solo (DG1 e DG2) são classificadas como A - 7 -5. Pela Classificação Unificada de solos (USCS), ambas as amostras de solo (DG1 e DG2) pertencem à classe OH – Argila orgânica.

4.2. Ensaio de compactação

São apresentadas as curvas de compactação das amostras DG1 e DG2 (figuras 10):

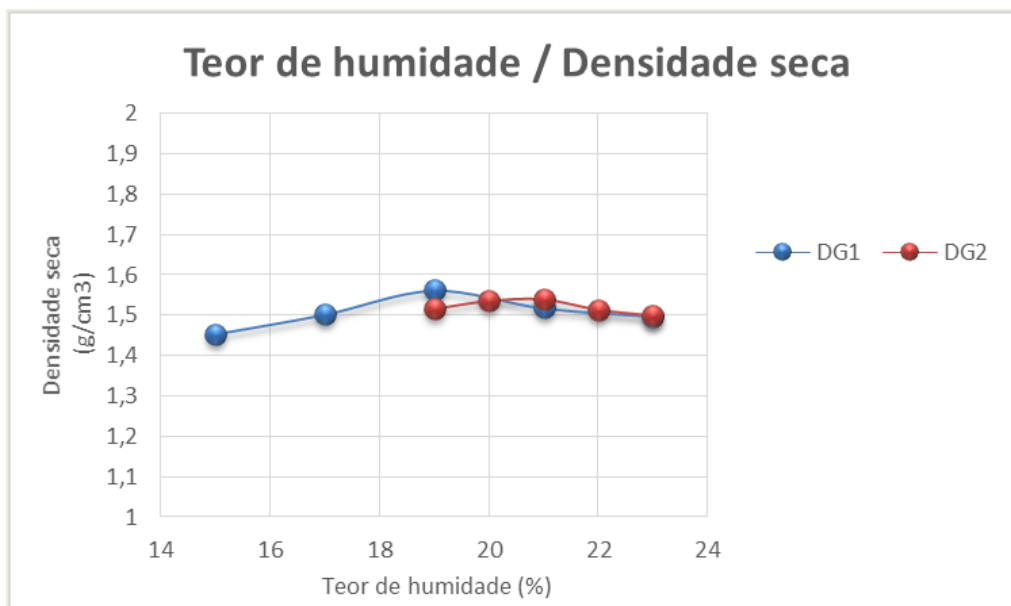


Figura 10: Curvas de compactação das amostras DG1 e DG2

Do traçado da curva de compactação (figura 10) verifica-se que a amostra de solo DG1 possui um teor em água ótimo de compactação de cerca de 19% e uma baridade seca máxima de $1,56 \text{ g/cm}^3$, ao passo que a amostra de solo DG2 possui um teor em água ótimo de compactação de 21% e uma baridade seca máxima de $1,52 \text{ g/cm}^3$.

4.3. Ensaio CBR

Os resultados do ensaio CBR das amostras de solo DG1 e DG2 são apresentados nas tabelas a seguir:

Tabela 4: Resultado do valor CBR da amostra DG1 para as diferentes energias de compactação

CBR após imersão do molde por 4 dias			
CBR (%) em	13,344	20,016	25,354
Proctor	1,6	1,4	1,3
NRB	3,3	2,7	2,5
MOD	3,5	2,8	2,6
Profundidade (mm)	2,54	5,08	7,62

Tabela 5: Resultado do valor da expansão da amostra DG1 para as diferentes energias de compactação

Expansão após imersão do molde por 4 dias			
	Proctor	NRB	MOD
Leitura no início (mm)	0	0	0
Leitura no fim (mm)	4,1	4,6	4,77
Expansão (%)	3,23	3,62	3,76

Tabela 6: Resultado do valor CBR da amostra DG2 para as diferentes energias de compactação

CBR após imersão do molde por 4 dias			
CBR (%) em	13,344	20,016	25,354
Proctor	0,9	0,8	0,9
NRB	1,6	1,5	1,5
MOD	1,6	1,7	1,7
Profundidade (mm)	2,54	5,08	7,62

Tabela 7: Resultado do valor da expansão da amostra DG2 para as diferentes energias de compactação

Expansão após imersão do molde por 4 dias			
	Proctor	NRB	MOD
Leitura no início (mm)	0	0	0
Leitura no fim (mm)	8,24	8,69	8,86
Expansão (%)	6,49	6,84	6,98

Visto que segundo (Jae,1995) e (Martins, 2018), é admissível que o corpo do aterro seja constituído por argilas orgânicas de elevada plasticidade (OH) desde que o valor CBR seja igual ou superior a 3%. No entanto, com base nos resultados dos ensaios CBR obtidos, foi possível constatar que a amostra DG1 pode ser usada no corpo do aterro em obras de estradas ao passo que a amostra DG2 não pode ser usada.

Nesta senda, surge a necessidade de se melhorar o valor de CBR da amostra DG2 e para este efeito foi realizado o ensaio CBR adaptado em um conjunto de sacos plásticos preenchidos com a amostra DG2, conforme apresentado no item a seguir.

4.4. Ensaio CBR adaptado

Os resultados do ensaio CBR para os sacos plásticos preenchidos com amostra de solo são apresentados na tabela a seguir:

a) $w_{ótimo} = 21\%$

Tabela 8: Resultado do valor CBR para os sacos preenchidos com a amostra DG2

CBR adaptado			
CBR(%) em	13,344	20,016	25,354
	5,3	6,3	6,7
Profundidade(mm)	2,54	5,08	7,62

b) $w = 38\%$

Tabela 9: Resultado do valor CBR para os sacos preenchidos com a amostra DG2

CBR adaptado			
CBR(%) em	13,344	20,016	25,354
	3,7	4,8	5,3
Profundidade (mm)	2,54	5,08	7,62

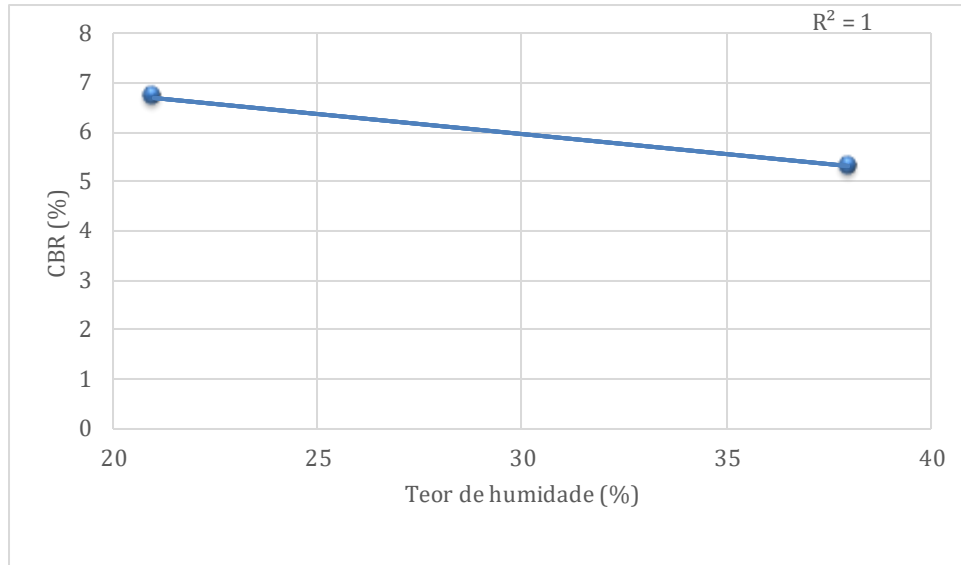


Figura 11: Gráfico CBR - teor de umidade dos sacos plásticos preenchidos com a amostra DG2

Com base nos resultados obtidos do ensaio CBR adaptado pode se verificar que quando a amostra DG2 é confinada em sacos plásticos o valor de CBR incrementa de forma significativa. Passando deste modo a estar em conformidade com o requisito necessário para o seu uso no corpo do aterro em obras de estradas. Por outro lado, é possível constatar que à medida que o teor de umidade do solo confinado no saco reduz o valor do CBR tende a aumentar, pois, com a redução do teor de umidade de 38% para 21% o CBR aumentou de 5.3% para 6.7%, respectivamente.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. CONCLUSÕES

- ❖ As amostras de solo do presente estudo são classificadas como do tipo A-7-5 segundo a classificação da AASTHO e pertencem à classe OH-Argila orgânica segundo a USCS.
- ❖ Foi verificado em laboratório que quando as amostras DG1 e DG2 são secas em estufa, o solo experimenta uma retracção não satisfatória, comportando-se deste modo como um material duro e resistente à deformação, porém, à medida que o mesmo material sofre um acréscimo do teor de humidade ele tende a comportar-se como um material plástico, mole e pouco resistente à deformação.
- ❖ Os resultados dos ensaios laboratoriais das amostras DG1 e DG2 revelam que a medida que o índice de plasticidade do solo aumenta a capacidade de suporte de carga tende a diminuir e a expansão do solo tende a aumentar, nesta senda, constatou-se que para o mesmo teor de humidade ao compactar o solo para uma densidade baixa é possível reduzir a expansão do solo.
- ❖ Através do ensaio CBR verificou-se que estes solos quando confinados em sacos plásticos apresentam melhorias no seu valor de CBR aumentando com a diminuição do teor de humidade do solo. A capacidade de suporte de carga do solo confinado em sacos plásticos é atribuído principalmente à força de tracção que ocorre ao longo do tecido do saco plástico, que é desenvolvida devido à extensão do perímetro do saco, isto é, quando uma força externa actua no solo confinado em sacos plásticos suficientemente compactado, o material de enchimento tende a se deformar pelas laterais, por sua vez o saco plástico restringe a deformação do material e, conseqüentemente a tensão de tracção é mobilizada ao longo do tecido do saco plástico.
- ❖ Verificou-se que para o mesmo valor de teor de humidade (teor de humidade ótimo), o valor de CBR para a amostra DG2 aumentou em 3,9 vezes quando o solo foi confinado em sacos plásticos, passando de 1.7% para 6.7%.
- ❖ Visto que o valor de CBR da argila orgânica de elevada plasticidade confinada em sacos plásticos foi superior a 3%, o seu uso no corpo do aterro é admissível desde que seja colocado material de reforço e/ou de controlo de humidade na parte inferior, no espaldar e na fundação do pavimento. O material a colocar na parte inferior, no espaldar e na fundação do pavimento deve ser constituído por material selecionado

pouco sensível à água e com valor de CBR maior ou igual a 15 % (camadas de areia vermelha, areia estabilizada com cimento, entre outros). Para além do aumento do valor de CBR, em geral, sugere-se o uso de argila orgânica de elevada plasticidade confinada em sacos plásticos porque também é possível controlar a variação do teor de humidade destes solos, podendo desta forma se fixar as características de resistência destes solos a longo prazo.

❖ Deste modo, conclui-se que as argilas orgânicas de elevada plasticidade existentes no troço da via de acesso a Praia de Macaneta podem ser usadas no corpo do aterro em obras de estradas, sendo que os solos que tiverem valor de CBR inferior a 3% devem ser reforçados através do seu confinamento em sacos plásticos com vista a fornecer a capacidade de suporte de carga necessária para atingir desempenhos aceitáveis sob acção da carga de tráfego e as demandas ambientais.

5.2. RECOMENDAÇÕES

❖ Como forma de obter informações complementares, recomenda-se a realização de troços experimentais monitorados e ensaiados (ensaio de carga em placa, entre outros) com vista a determinar a variação da sua capacidade de carga para a condição de ocorrência de chuvas intensas para melhor avaliação do comportamento do método de construção *soilbag* em obra.

❖ Igualmente também se recomenda-se a realização de troços experimentais monitorados e ensaiados para melhor avaliação do comportamento do método de construção *soilbag* quando os sacos estão danificados de tal forma que permitam a entrada de humidade no seu interior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azzo, S. I. (2009). Treatment of Expansive Clayey Soil in AL-Wahda Districtat Mosul City with Crushed Limestone. *Iraqi National Journal of Earth Sciences*, p. 1–10.

Barnes, G., & Tibana, S. (2016). *Mecânica dos Solos: Princípios e Práticas* (3ª ed.). Brasil: ELSEVIER, p. 486.

Chhachffla, A. (2015). Improvement of Clayey Soil Stabilized. National Institute of Technology Kurukshetra, Department of Civil Engineering.

Cristelo, N. (2001). Estabilização de Solos Residuais Graníticos através da Adição de Cal. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Guimarães, p. 67-68.

Cunha, C. L. dos S. (2012). Estudo das Características de Compressibilidade Unidimensional e Plasticidade de Misturas de Argila e Areia, p.125.

Daito, *et al.*, (2012). Investigação do valor CBR de sacos de areia com razão de teor de água e número de sacos de areia como parâmetros. Escola de Pós-Graduação da Universidade de Kyoto.

Das, B. M. (2007). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. São Paulo: Thomson Learning, p. 51-52.

Elsharief, A. M., & Sumaya A. M. (2001). Design Considerations of Pavements on Expansive Clay Soils in Sudan, National Engineering Conference on Roads, p. 94-98.

Faezehossadat, K., & Jeff, B. (2016). Expansive Soil: Causes and Treatments. *i-manager's Journal on Civil Engineering*, p. 67.

Hamza, O. S. M. (2014). Treatment of Expansive Subgrade Soils Using Lime and Fly Ash. Thesis for the degree of M.Sc. University of Khartoum. Department of Civil Engineering, p. 16-21.

Hensley, T. T., *et al.*, (2007). Pozzolan Stabilized Subgrades Nebraska Department of Roads.

JAE. (1995). Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional. JAE (actual E.P.). Almada.

Jeyapalan Jey K, R. G. State-of-the-Art Review of Expansive. Texas A&M University.

Kimura, M., & Fukubayashi, Y. (2012). Rural Road Maintenance Using Geotextile Available in Developing Countries. Advances in Transportation Geotechnics II - Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Geotechnics, October, p. 486-491.

Liu, S. *et al.*, (2013). Treatment for Expansive Soil Channel Slope with Soilbags. Journal of Aerospace Engineering, vol. 26, n.4, p. 657-666.

Lucian, C., (2006). Geotechnical Aspects of Buildings on Expansive Soils in Kibaha, Tanzania: Preliminary Stud. Royal Institute of Technology. Department of Civil and Architectural Engineering, Stockholm, p. 24.

LNEC E304. (1974). Pavimentos Rodoviários. Solo-cimento. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Machado, S., e Machado, M. (1997). Mecânica dos Solos I – Conceitos Introdutórios. Universidade Federal da Bahia, Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Bahia, p. 45-60.

Martins, C. M. V. (2018). Caracterização Laboratorial de Solos – Nova Normalização. Instituto Superior de Engenharia do Porto, p.25.

Matsuoka. Soilbag Structures. Nagoya Institute of Technology. Department of Civil Engineering, p. 1-3

Matsuoka, H., & Liu, S. H. (2003). New Earth Reinforcement Method by Soilbags (DONOW). Soils Found. p.173-188.

Matsouka, *et al.*, (2007). Simulação Numérica de Características de Capacidade de Suporte Acompanhadas por Deformação Finita de Solo de Reforço de Saco de Areia., Geotechnical Journal, Vol.2, No.1, p.11-23.

Meira, J.M. (2001). Argilas: o que são, suas propriedades e classificações. Visa Consultores, Comunicações Técnicas, p. 1-2.

Ministry of Communications of the People's Republic of China (CMOC). (1996a). Technical specifications for the construction of highway subgrades JTJ033-95., Renmin Communication Press, Beijing.

National Lime Association. (2006). Mixture Design and Testing Procedures for Limestabilized Soil.

NBR 9604. (1986), Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo, com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas.

Neves, E. N. S. de A. C. (2009). Estudo Laboratorial de Solos Tratados com Cal Modelos de Comportamento, p.156.

Nomoto, F., & Matsuoka, H. (2015). Exemplo de construção de estradas em pântanos usando o método de construção de sacos de areia conectados de alto padrão, p. 3-4.

Pinto, Carlos de Sousa. (2006). Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. 3.ed. São Paulo: Oficina de Textos.

Reddy, N. G., *et al.*, (2015). Evaluating the Influence of Additives on Swelling Characteristics of Expansive Soils. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*.

Santos, J. R. M. (2011). Comportamento Geotécnico de Solos Argilosos do Vale Diapírico de Sesimbra. Universidade Nova de Lisboa. Departamento de Engenharia Geológica, Lisboa, p. 55-57.

Santos, L.A. (2013). Uso de Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar na Produção de Concretos Especiais para Aplicação em Meios Agressivos de Instalações Agro-industriais. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola, Viçosa, p. 32-34.

Sataloff, R.T., *et al.*, (2013). Contramedidas de solo ultra-suave e contramedidas de vibração ambiental pelo método de construção DBOX.

Silva, A. C. S. (2013). Definição de Padrões de Plasticidade de Solos através do Cone de Penetração, por comparação com o método de Casagrande, p. 75.

Silva, M. (2010). Estudo Comparativo de dois Solos Argilosos Estabilizados com Cal. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, p. 36-38.

TMH1 Method A1. The Wet Preparation and Sieve Analysis of Gravel, Sand and Soil Samples.

TMH1 Method A2. The Determination of the Liquid Limit of Soils by Means of the Flow Curve Method.

TMH1 Method A3. The Determination of the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils.

TMH1 Method A4. The Determination of the Linear Shrinkage of Soils.

TMH1 Method A7. The Determination of the Maximum Dry Density and Optimum Moisture Content of Gravel, Soil and Sand.

TMH1 Method A8. The Determination of the California Bearing Ratio of Untreated Soils and Gravels.

Xu, Y., *et al.*, (2008). Earth Reinforcement using soilbags. *Geotextiles and Geomembranes*, p. 279–289.

Zheng, J.L, *et al.*, (2009). Highway Subgrade Construction in Expansive Soil Areas. *Journal of Materials in Civil Engineering*, p. 58–61.

ANEXOS

ANEXO 1- DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE NATURAL

Tabela 10: Determinação do teor de humidade natural da amostra DG1

Determinação do teor de humidade natural			
Tese de Licenciatura	Cor da amostra: Vermelho escuro		
Especificação: TMH1, Method A17	Profundidade de colheita: 55-75cm		
Data: 26/01/2021	No. da amostra: DG1		
Localização: Macaneta	Operador: Danilo Garrine		
Cápsula no.	91	92	62
Peso do solo húmido + Cápsula (g)	81,07	88,45	86,21
Peso do solo seco + Cápsula (g)	74,15	78,85	76,88
Peso da água (g)	6,92	9,6	9,33
Peso da cápsula (g)	66,09	67,6	65,98
Peso do solo seco (g)	8,06	11,25	10,9
Teor de humidade (%)	85,86	85,33	85,60
Média (%)	85,6		

Resultado:

$W_{\text{natural}} = 85.6\%$

Tabela 11: Determinação do teor de humidade natural da amostra DG2

Determinação do teor de humidade natural			
Tese de Licenciatura	Cor da amostra: Cinza escuro		
Especificação: TMH1, Method A17	Profundidade de colheita: 60-80cm		
Data: 26/01/2021	No. da amostra: DG2		
Localização: Macaneta	Operador: Danilo Garrine		
Cápsula no.	90	94	95
Peso do solo húmido + Cápsula (g)	85,31	87,41	85,48
Peso do solo seco + Cápsula (g)	74,68	76,59	75,68
Peso da água (g)	10,63	10,82	9,8
Peso da cápsula (g)	65,83	67,54	67,57
Peso do solo seco (g)	8,85	9,05	8,11
Teor de humidade (%)	120,11	119,56	120,84
Média (%)	120,2		

Resultado:

$W_{\text{natural}} = 120.2\%$

ANEXO 2 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

a) Análise granulométrica por peneiramento

Tabela 12: Análise granulométrica da amostra DG1 retida do peneiro nº 200 após lavagem e secagem em estufa

Granulometria			
Tese de Licenciatura	Cor da amostra: Vermelho escuro		
Especificação: ASTM C136	Profundidade de colheita: 55-75cm		
Data: 28/01/2021	No. da amostra: DG1		
Localização: Macaneta	Peso da amostra seca: 613.7g		
Cascalho: 0%	Peso da amostra lavada após secagem: 70g		
Areia: 11.41%	Peso da amostra perdida na lavagem < 0.075mm: 543.7g		
Silte e Argila: 88.59%	Operador: Danilo Garrine		
Peneiro (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Acumulado que passa (%)
19	-	-	100
13,2	-	-	100
9,500	-	-	100
4,75	-	-	100
2	0,20	0,03	99,97
1,18	0,50	0,08	99,89
0,425	5,00	0,81	99,07
0,25	23,90	3,89	95,18
0,15	36,10	5,88	89,29
0,075	4,30	0,70	88,59
Bandeja	-	-	88,59

Tabela 13: Análise granulométrica da amostra DG2 retida do peneiro nº 200 após lavagem e secagem em estufa

Granulometria			
Tese de Licenciatura	Cor da amostra: Cinza escuro		
Especificação: ASTM C136	Profundidade de colheita: 60-80cm		
Data: 04/02/2021	No. da amostra: DG2		
Localização: Macaneta	Peso da amostra seca: 560.8g		
Cascalho: 0%	Peso da amostra lavada após secagem: 73.3g		
Areia: 13.07%	Peso da amostra perdida na lavagem < 0.075mm: 487.5g		
Silte e Argila: 86.93%	Operador: Danilo Garrine		
Peneiro (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Acumulado que passa (%)
19	-	-	100
13,2	-	-	100
9,500	-	-	100
4,75	-	-	100
2	-	-	100
1,18	0,50	0,09	99,91
0,425	21,70	3,87	96,04
0,25	28,10	5,01	91,03
0,15	20,50	3,66	87,38
0,075	2,50	0,45	86,93
Bandeja	-	-	86,93

ANEXO 3 - DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE CONSISTÊNCIA E RETRACÇÃO LINEAR

Tabela 14: Determinação do limite de liquidez da amostra DG1

Determinação do limite de liquidez			
Tese de Licenciatura	Cor da amostra: Vermelho escuro		
Especificação: TMH1, Method A2	Profundidade de colheita: 55-75cm		
Data: 28/01/2021	No. da amostra: DG1		
Localização: Macaneta	Operador: Danilo Garrine		
Cápsula no.	91	94	95
Peso do solo húmido + Cápsula (g)	68,42	68,84	68,98
Peso do solo seco + Cápsula (g)	67,58	68,4	68,51
Peso da água (g)	0,84	0,44	0,47
Peso da cápsula (g)	66,11	67,58	67,6
Peso do solo seco (g)	1,47	0,82	0,91
Teor de humidade (%)	57,14	53,66	51,65
Número de pancadas	22,0	28,0	33,0

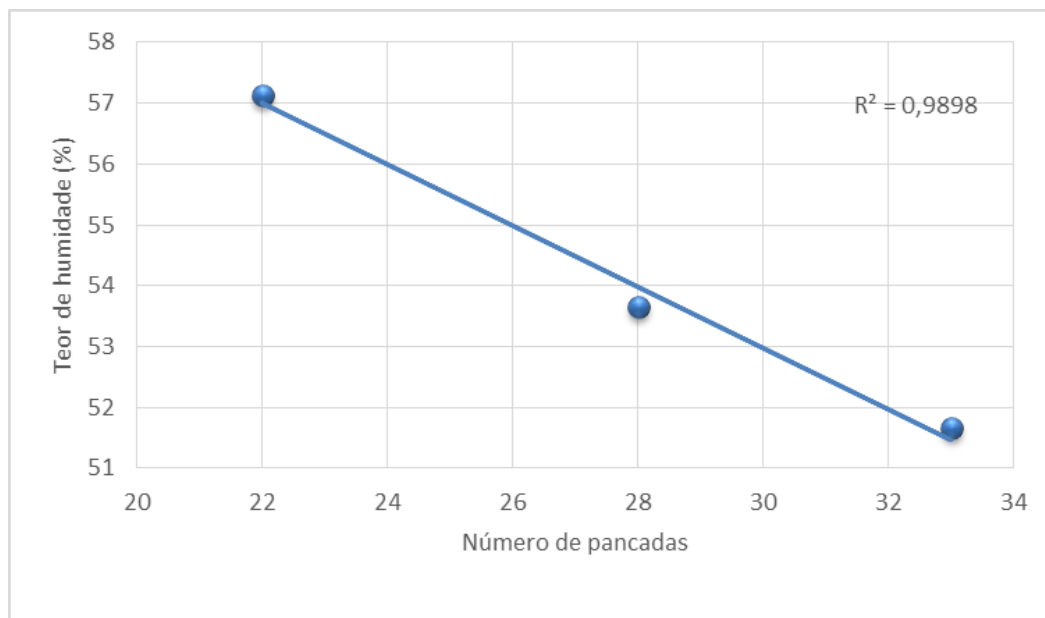


Figura 12: Curva de fluidez para determinação do limite de liquidez da amostra DG1

Resultado:

LL= 55.5%

Tabela 15: Determinação do limite de plasticidade da amostra DG1

Determinação do limite de plasticidade		
Tese de Licenciatura	Cor da amostra: Vermelho escuro	
Especificação: TMH1, Method A3	Profundidade de colheita: 55-75cm	
Data: 28/01/2021	No. da amostra: DG1	
Localização: Macaneta	Operador: Danilo Garrine	
Cápsula no.	62	87
Peso do solo húmido + Cápsula (g)	67,64	68,78
Peso do solo seco + Cápsula (g)	67,24	68,48
Peso da água (g)	0,4	0,3
Peso da cápsula (g)	66	67,49
Peso do solo seco (g)	1,24	0,99
Teor de humidade (%)	32,26	30,30
Média (%)	31,28	

Resultado:

LP = 31.28%

IP = LL – LP = 55.50% - 31.28%= 24.22%

Tabela 16: Determinação da retracção linear da amostra DG1

Determinação da retracção linear	
Tese de Licenciatura	Cor da amostra: Vermelho escuro
Especificação: TMH1, Method A4	Profundidade de colheita: 55-75cm
Data: 28/01/2021	No. da amostra: DG1
Localização: Macaneta	Operador: Danilo Garrine
Calha no.	XL
Número de pancadas	28
Comprimento antes da secagem (mm)	150,00
Comprimento depois da secagem (mm)	131,72
Retracção linear (%)	12,19

Resultado:

LL = 55.5%;

LP= 31.3%;

IP= 24.2%;

RL= 12.19%

Tabela 17: Determinação do limite de liquidez da amostra DG2

Determinação do limite de liquidez			
Tese de Licenciatura	Cor da amostra: Cinza escuro		
Especificação: TMH1, Method A2	Profundidade de colheita: 60-80cm		
Data: 28/01/2021	No. da amostra: DG2		
Localização: Macaneta	Operador: Danilo Garrine		
Cápsula no.	41	61	34
Peso do solo húmido + Cápsula (g)	70,34	70,39	69,2
Peso do solo seco + Cápsula (g)	68,43	69,25	68,51
Peso da água (g)	1,91	1,14	0,69
Peso da cápsula (g)	65,85	67,68	67,55
Peso do solo seco (g)	2,58	1,57	0,96
Teor de humidade (%)	74,03	72,61	71,87
Número de pancadas	20,0	27,0	32,0

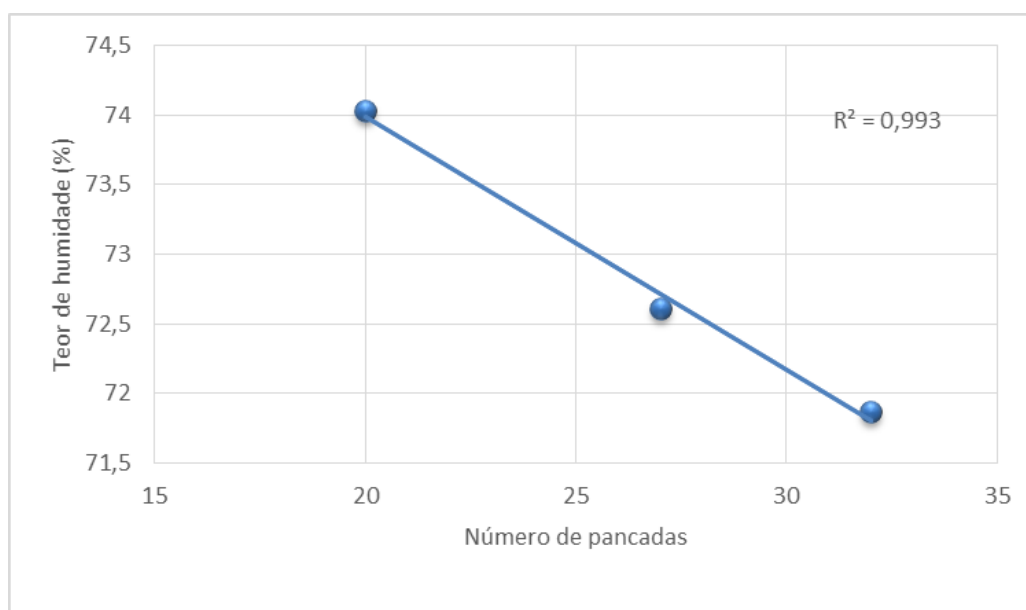


Figura 13: Curva de fluidez para determinação do limite de liquidez da amostra DG2

Resultado:

LL= 73.10%

Tabela 18: Determinação do limite de plasticidade da amostra DG1

Determinação do limite de plasticidade		
Tese de Licenciatura	Cor da amostra: Cinza escuro	
Especificação: TMH1, Method A3	Profundidade de colheita: 60-80cm	
Data: 28/01/2021	No. da amostra: DG2	
Localização: Macaneta	Operador: Danilo Garrine	
Cápsula no.	79	88
Peso do solo húmido + Cápsula (g)	67,73	69,5
Peso do solo seco + Cápsula (g)	67,19	68,93
Peso da água (g)	0,54	0,57
Peso da cápsula (g)	65,92	67,51
Peso do solo seco (g)	1,27	1,42
Teor de humidade (%)	42,52	40,14
Média (%)	41,33	

Resultado:

LP = 41.33%

IP = LL – LP = 73.10% – 41.33% = 31.77 %

Tabela 19: Determinação da retracção linear da amostra DG2

Determinação da retracção linear	
Tese de Licenciatura	Cor da amostra: Cinza escuro
Especificação: TMH1, Method A4	Profundidade de colheita: 60-80cm
Data: 28/01/2021	No. da amostra: DG2
Localização: Macaneta	Operador: Danilo Garrine
Calha no.	V
Número de pancadas	27
Comprimento antes da secagem (mm)	150
Comprimento depois da secagem (mm)	126
Retracção linear (%)	16

Resultado:

LL = 73.10%;

LP = 41.33%;

IP = 31.77%;

LR = 16%

ANEXO 4 - DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE ÓPTIMO E DA DENSIDADE SECA MÁXIMA

Tabela 20: Determinação da densidade seca máxima e teor de humidade óptimo a amostra DG1

Determinação da densidade seca máxima e teor de humidade óptimo					
Tese de Licenciatura			Cor da amostra: Vermelho escuro		
Especificação: TMH1, Method A7			Profundidade de colheita: 55-75cm		
Data: 15/01/2021			No. da amostra: DG1		
Localização: Macaneta			Operador: Danilo Garrine		
Número de pancadas: 55			No. de camadas: 5	Peso do soquete: 4.536 kg	
Molde no.	1	1	1	1	1
Teor de humidade adicionado (%)	15	17	19	21	23
Peso do molde + material húmido (g)	8675	8875	9100	9058	9069
Peso do molde (g)	4820	4820	4820	4820	4820
Peso da amostra húmida (g)	3855	4055	4280	4238	4249
Volume do molde (cm ³)	2303	2303	2303	2303	2303
Densidade húmida (g/cm ³)	1,674	1,761	1,858	1,840	1,845
Densidade seca preliminar (g/cm ³)	1,456	1,505	1,562	1,521	1,500
Cápsula no.	AE	1	H	AD	CF
Peso do solo húmido + Cápsula (g)	566,7	550,8	562,7	564,3	559,7
Peso do solo seco + Cápsula (g)	501,5	479,74	483,06	477,2	466,68
Peso da água (g)	65,2	71,06	79,64	87,1	93,02
Peso da cápsula (g)	63,9	64,2	63,7	64,5	64
Peso do solo seco (g)	437,6	415,54	419,36	412,7	402,68
Teor de humidade (%)	14,90	17,10	18,99	21,10	23,10
Densidade seca (g/cm³)	1,457	1,504	1,562	1,520	1,499

Tabela 21: Determinação da densidade seca máxima e teor de humidade óptimo a amostra DG2

Determinação da densidade seca máxima e teor de humidade óptimo					
Tese de Licenciatura			Cor da amostra: Cinza escuro		
Especificação: TMH1, Method A7			Profundidade de colheita: 60-80cm		
Data: 09/02/2021			No. da amostra: DG2		
Localização: Macaneta			Operador: Danilo Garrine		
Número de pancadas: 55		No. de camadas: 5		Peso do soquete: 4.536 kg	
Molde no.	1	1	1	1	1
Teor de humidade adicionado (%)	13	14	15	16	17
Peso do molde + material húmido (g)	8974	9067	9112	9070	9064
Peso do molde (g)	4820	4820	4820	4820	4820
Peso da amostra húmida (g)	4154	4247	4292	4250	4244
Volume do molde (cm ³)	2303	2303	2303	2303	2303
Densidade húmida (g/cm ³)	1,804	1,844	1,864	1,845	1,843
Densidade seca preliminar (g/cm ³)	1,596	1,618	1,621	1,591	1,575
Cápsula no.	10	6	7	1A	9
Peso do solo húmido + Cápsula (g)	268,5	220,82	285,9	236,41	248,93
Peso do solo seco + Cápsula (g)	236,41	194,93	247,71	205,37	214,66
Peso da água (g)	32,09	25,89	38,19	31,04	34,27
Peso da cápsula (g)	68,2	65,8	66,1	64,1	65,6
Peso do solo seco (g)	168,21	129,13	181,61	141,27	149,06
Teor de humidade (%)	19,08	20,05	21,03	21,97	22,99
Densidade seca (g/cm³)	1,515	1,536	1,540	1,513	1,498

ANEXO 5 - DETERMINAÇÃO DO CBR DA AMOSTRA IMERSA POR 4 DIAS

Tabela 22: Leitura da carga de penetração na prensa (kN) da amostra DG1

Leituras da carga de penetração na prensa (kN)			
Profundidade (mm)	Proctor 90%	NRB 95%	MOD 100%
0	0	0	0
0.635	0.07	0.15	0.24
1.27	0.14	0.29	0.36
1.905	0.19	0.37	0.44
2.54	0.21	0.44	0.47
3.175	0.23	0.47	0.51
3.810	0.25	0.51	0.54
4.445	0.26	0.54	0.56
5.08	0.28	0.55	0.57
5.712	0.3	0.57	0.59
6.350	0.32	0.6	0.61
6.985	0.33	0.61	0.63
7.620	0.34	0.63	0.65
8.255	0.35	0.65	0.66
8.890	0.36	0.67	0.69
9.525	0.37	0.68	0.7

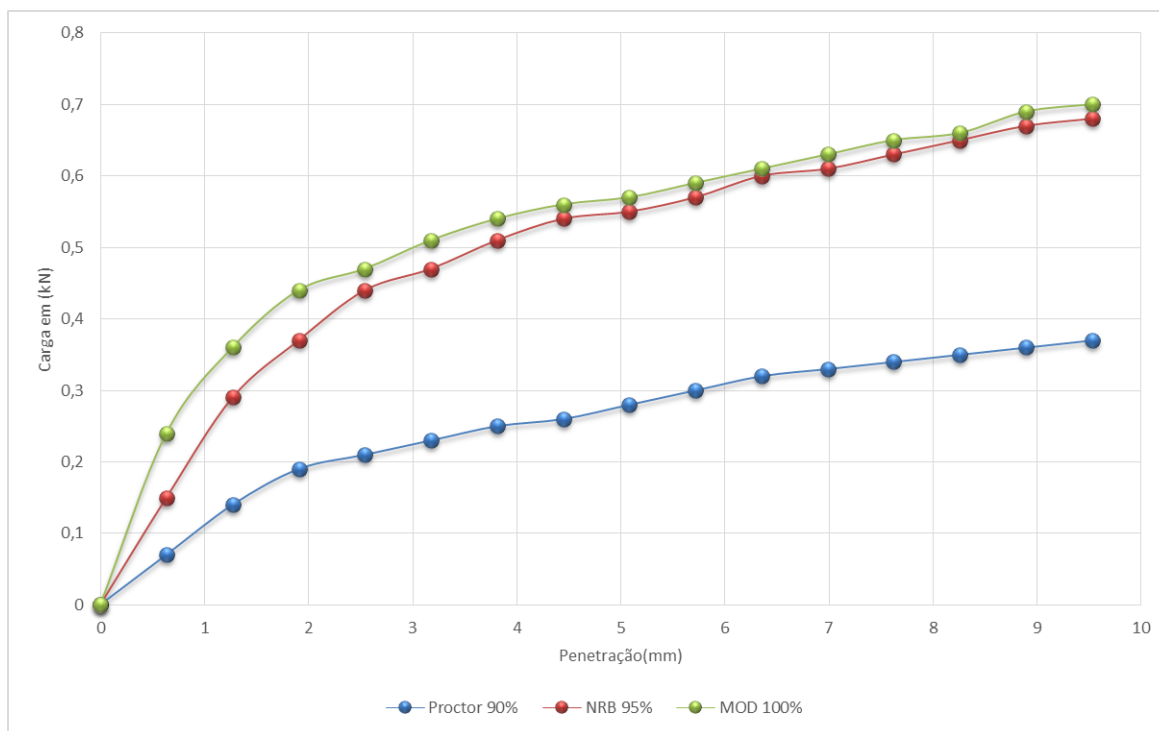


Figura 14: Curva carga – penetração da amostra DG1 para as diferentes energias de compactação

Tabela 23: Determinação da densidade seca da amostra DG1

Determinação da densidade seca para o ensaio de CBR			
Tese de Licenciatura		Cor da amostra: Vermelho escuro	
Especificação: TMH1, Method A8		Profundidade de colecta: 55-75cm	
Data: 09/02/2021		No. da amostra: DG1	
Localização: Macaneta		Operador: Danilo Garrine	
Densidade maxima seca = 1.562 g/cm ³		Teor de humidade optimo = 18.99%	
Energia de compactação	Proctor	NRB	MOD
Molde no.	16	14	15
Peso do molde + material húmido (g)	8476	9140	8643
Peso do molde (g)	4194	4846	4296
Peso da amostra húmida (g)	4282	4294	4347
Volume do molde (cm ³)	2326	2327	2337
Densidade húmida (g/cm ³)	1.841	1.845	1.860
Cápsula no.	AE	1	H
Peso do solo húmido + Cápsula (g)	301.9	273.8	332.8
Peso do solo seco + Cápsula (g)	264	241.1	289.6
Peso da água (g)	37.9	32.7	43.2
Peso da cápsula (g)	65.7	68.5	63.7
Peso do solo seco (g)	198.3	172.6	225.9
Teor de humidade (%)	19.11	18.95	19.12
Densidade seca (g/cm ³)	1.546	1.551	1.561
Densidade seca obtida (%)	98.9	99.3	100.0

Tabela 24: Leitura da carga de penetração na prensa (kN) da amostra DG2

Leituras da carga de penetração na prensa (kN)			
Profundidade (mm)	Proctor 90%	NRB 95%	MOD 100%
0	0	0	0
0.635	0.05	0.06	0.07
1.27	0.09	0.11	0.12
1.905	0.1	0.16	0.17
2.54	0.12	0.21	0.22
3.175	0.14	0.23	0.26
3.810	0.15	0.26	0.29
4.445	0.16	0.29	0.32
5.08	0.17	0.3	0.35
5.712	0.19	0.32	0.38
6.350	0.2	0.35	0.4
6.985	0.21	0.36	0.41
7.620	0.22	0.39	0.43
8.255	0.24	0.4	0.46
8.890	0.25	0.41	0.48
9.525	0.27	0.43	0.49

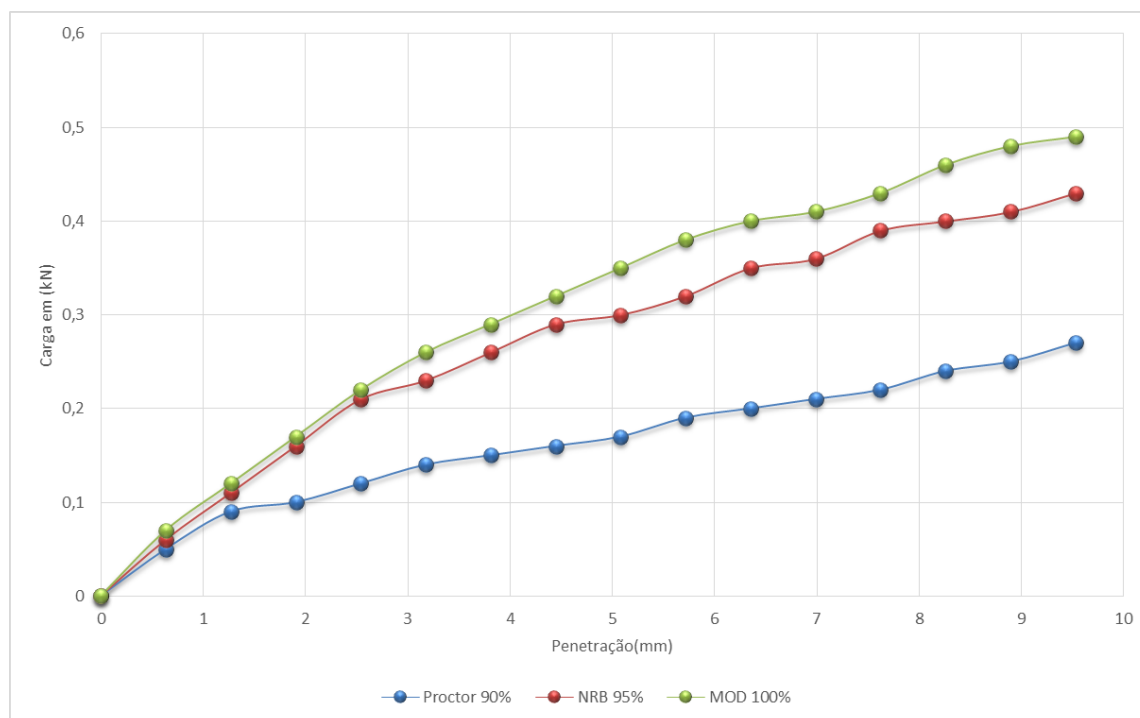


Figura 15: Curva carga – penetração da amostra DG2 para as diferentes energias de compactação

Tabela 25: Determinação da densidade seca da amostra DG2

Determinação da densidade seca para o ensaio de CBR			
Tese de Licenciatura		Cor da amostra: Cinza escuro	
Especificação: TMH1, Method A8		Profundidade de colecta: 60-80cm	
Data: 01/03/2021		No. da amostra: DG2	
Localização: Macaneta		Operador: Danilo Garrine	
Densidade máxima seca = 1.54 g/cm ³		Teor de humidade optimo = 21%	
Energia de compactação	Proctor	NRB	MOD
Molde no.	14	12	6
Peso do molde + material húmido (g)	7557	7944	9199
Peso do molde (g)	4846	4194	4870
Peso da amostra húmida (g)	2711	3750	4329
Volume do molde (cm ³)	2327	2326	2323
Densidade húmida (g/cm ³)	1.165	1.612	1.864
Cápsula no.	AE	1	H
Peso do solo húmido + Cápsula (g)	301.9	276.1	332.8
Peso do solo seco + Cápsula (g)	260.92	239.99	285.97
Peso da água (g)	40.98	36.11	46.83
Peso da cápsula (g)	65.7	68.5	63.7
Peso do solo seco (g)	195.22	171.49	222.27
Teor de humidade (%)	20.99	21.06	21.07
Densidade seca (g/cm ³)	0.963	1.332	1.539
Densidade seca obtida (%)	62.5	86.5	100.0

ANEXO 6 - DETERMINAÇÃO DO CBR MODIFICADO DO SACO PLÁSTICO PREENCHIDO COM AMOSTRA DG2

Tabela 26: Leitura da carga de penetração na prensa (kN) do saco preenchido com a amostra DG2 no $w_{ótimo} = 21\%$

Leituras da carga de penetração na prensa (kN)	
Profundidade (mm)	
0	0
0.635	0.21
1.27	0.39
1.905	0.55
2.54	0.71
3.175	0.87
3.810	1.01
4.445	1.13
5.08	1.26
5.715	1.37
6.350	1.47
6.985	1.59
7.620	1.7
8.255	1.8
8.890	1.91
9.525	1.97

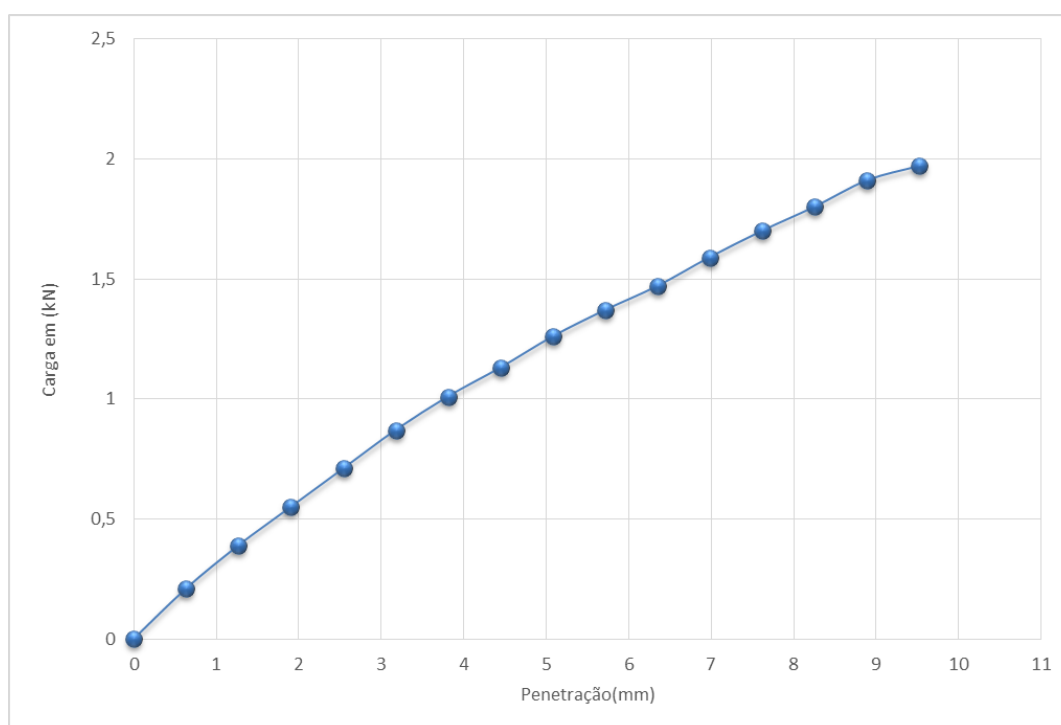


Figura 16: Curva carga – penetração do saco plástico preenchido com a amostra DG2
no $w_{ótimo} = 21\%$

Tabela 27: Leitura da carga de penetração na prensa (kN) do saco preenchido com a amostra DG2 no w= 38%

Leituras da carga de penetração na prensa (kN)	
Profundidade (mm)	
0	0
0,635	0,13
1,27	0,26
1,905	0,37
2,54	0,49
3,175	0,61
3,810	0,73
4,445	0,85
5,08	0,97
5,712	1,09
6,350	1,18
6,985	1,27
7,620	1,35
8,255	1,43
8,890	1,5
9,525	1,57

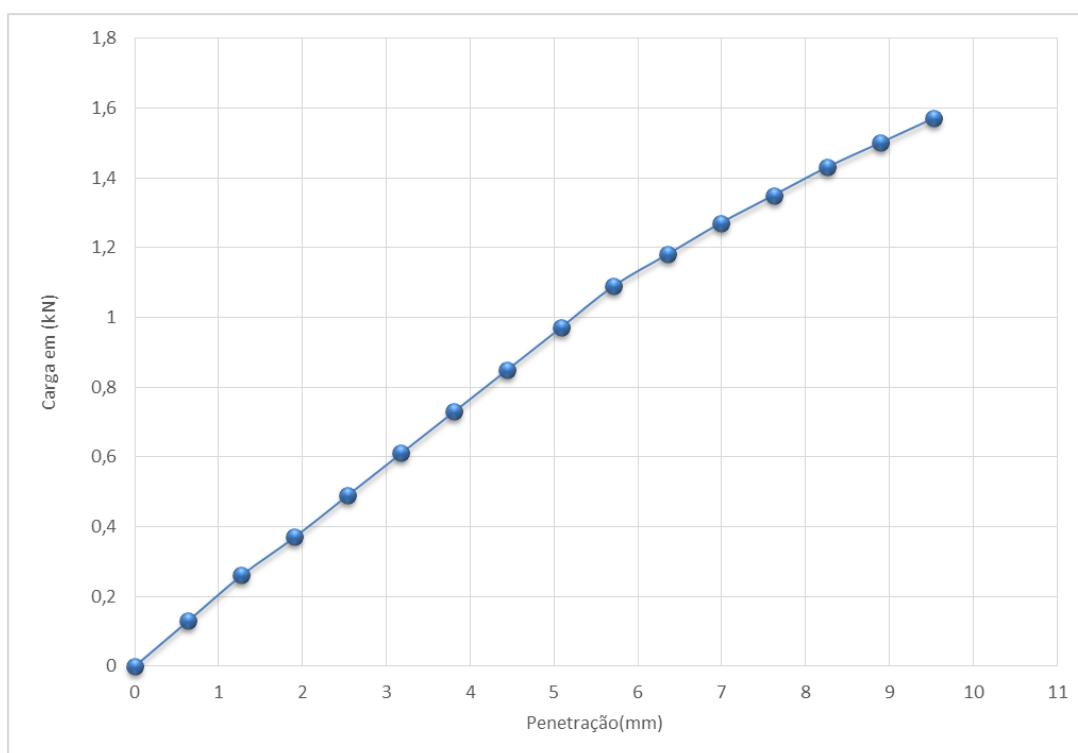


Figura 17: Curva carga – penetração do saco plástico preenchido com a amostra DG2 no w= 38%