

UNIVERSIDADE POLITÉCNICA

APOLITÉCNICA

ESGCT - Escola Superior de Gestão, Ciência e Tecnologias

Engenharia Civil

*Monografia Apresentada à Universidade
Politécnica como parte dos requisitos de
graduação e obtenção do grau de
Licenciatura em Engenharia Civil*

*Supervisor: Prof. Doutor. Eng. José
Francisco Rufino Diogo*

António Pedro dos Santos Arrone

Nº 203211

Maputo, Setembro de 2017

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, António Pedro dos Santos Arrone, declaro que este trabalho de fim do curso foi exclusivamente realizado por mim. O mesmo é agora submetido de acordo com os requisitos e exigências para obtenção do grau de licenciatura em Engenharia Civil na Universidade Politécnica em Maputo.

Assinatura _____

Maputo, Data: ____/____/____

DEDICATÓRIA

*Aos meus queridos filhos
Yihanike e Sancha,
que são as flores que dão brilho à minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho gostaria de aproveitar a oportunidade para agradecer a todos os que directo ou indirectamente me apoiaram para torná-lo uma realidade.

Em primeiro lugar, agradecer a minha esposa Luísa, pelo seu amor, paciência, suporte, e por ter apoiado até chegar ao fim.

Aos meus queridos filhos Yihanike e Sancha, que muitas vezes ficaram sem a devida atenção porque o pai tinha de se ocupar com os estudos.

Aos meus pais Pedro e Inocência, meus irmãos Francisco, Luís e Estevão pelo ensinamento, incentivo, amor dedicado e pelo simples fato de estarem sempre comigo.

Aos Docentes e Colegas que me acompanharam neste percurso durante o tempo em que estive a fazer a minha licenciatura.

Aos dois amigos, o Eng. Carlos Pimentel e o Eng. Arlindo Mapande, que tanto contribuíram para a realização do presente trabalho.

Aos colegas Castigo Nhumaió e Gaspar Cumbane do Laboratório de Engenharia de Moçambique, que tanto contribuíram para a realização dos ensaios no laboratório.

E finalmente ao Prof. Professor José Francisco Rufino Diogo, meu supervisor, que pela sua paciência, dedicação e orientação fez com que fosse possível a conclusão deste trabalho.

E, sobretudo a Deus, pela vida, força e fé que me fizeram chegar até aqui e jamais me deixou desistir diante dos obstáculos.

A todos o meu muito obrigado.

INDICE	Página
CAPITULO I – METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO	1
1.2.O PROCESSO DE INVESTIGAÇÃO.....	3
1.3.O PROBLEMA A SER INVESTIGADO.....	3
1.4.A PERGUNTA A INVESTIGAR E AS HIPÓTESES A CONSIDERAR.....	4
1.4.1.As Hipóteses H0 e H1	4
1.4.2.As perguntas investigativas	5
1.5.METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO.....	5
1.6.CONSTRANGIMENTOS PREVISTOS NA INVESTIGAÇÃO.....	6
1.6.1.As limitações da Pesquisa	6
1.6.2.As delimitações da Pesquisa	6
1.7.COMPOSIÇÃO DOS CAPÍTULOS E SEUS CONTEÚDOS	7
<i>CAPÍTULO 1 – O MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO:</i>	7
<i>CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LEITURA BIBLIOGRÁFICA:</i>	7
<i>CAPÍTULO 3 – ESTUDO DE APLICABILIDADE DE SOLOS ESTABILIZADOS COM ADITIVOS HOMYSOLO GB</i>	8
<i>CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES:</i>	8
1.8.1.Objectivo geral	8
1.8.2.Objectivos específicos.....	9
1.9.IMPORTÂNCIA DO TEMA DA INVESTIGAÇÃO	10
 CAPÍTULO II - REVISÃO DA LEITURA BIBLIOGRÁFICA.....	 11
2.1.ESTUDOS PRÉVIOS	11
2.2.DEFINIÇÕES PERTINENTES	11
2.2.1.Solo	11
2.2.2.Origem e Constituição.....	12
2.2.3.Estabilização do Solo	12
2.2.3.1.Estabilização Mecânica	12
2.2.3.2.Estabilização Física	13
2.2.3.3.Estabilização Química.....	13
2.2.4.Aditivo HomysoloGb	14
2.2.5.Aglomerante Cimento Portland.....	14
2.2.6.Reagente Sulfato de Alumínio	14
2.3.ENSAIOS LABORATORIAIS	14
2.3.1.Amostragem	15
2.3.2.Preparação de amostras	15
2.3.3.Análise Granulométrica.....	15
2.3.4.Limites de Consistência	16
2.3.5.Limite de Liquidez (LL).....	16
2.3.6.Limite de Plasticidade (LP).....	17
2.3.7.Índice de Plasticidade (IP).....	17
2.3.8.Classificação dos Solos	17
2.3.9.Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS.....	18
2.3.10.Sistema de Classificação para Fins Rodoviário (AASHTO)	19
2.3.11.Compactação dos Solos.....	20
2.3.12.Ensaio de Compactação.....	21

2.3.13. Controle de Compactação no Campo	21
2.3.14. Ensaio de CBR (Índice Californiano)	22
2.3.15. Expansibilidade	22

CAPÍTULO III – METODOLOGIA DE PREPARAÇÃO DO ESTABILIZANTE DE SOLOS HOMYSOLO GB.....24

3.1. ADITIVO HOMYSOLOGB	24
3.1.1. Função do HomysoloGb.....	24
3.1.2. Vantagens da utilização do HomysoloGb	24
3.1.3. Característica do Solo recomendado para uso do HomysoloGb	24
3.1.4. Tipos de estabilização química de solos com HomysoloGb	25
3.1.5. Procedimento para determinação do CBR	25
3.1.6. Procedimento de preparo das soluções de trabalho.....	26
3.1.6.1. Solução de HomySoloGb a 5% em peso.....	26
3.1.6.2. Solução de Sulfato de Alumínio a 1% em peso	26
3.1.7. Ensaio com solos com predominância da fracção argila.....	26
3.1.7.1. Solução de HomysoloGb a 5% em peso	26
3.1.8. Aglomerante Cimento Portland ou Cal Hidráulica Seca.....	27
3.1.8.1. Moldagem dos Provetes	27
3.1.9. Ensaio com solos com predominância da fracção areia	27
3.1.9.1. Solução de HomysoloGb a 5% em peso	27
3.1.10. Solução de Sulfato de Alumínio a 1%	28
3.1.10.1. Moldagem dos Provetes	28
3.1.10.2. Secagem dos provetes e imersão para saturação	29
3.2. MÉTODOS.....	29

CAPÍTULO IV – ESTUDO DE CASO: ENSAIOS E ANÁLISE DE RESULTADOS DE ESTABILIZAÇÃO COM ADITIVO E AGLOMERANTE CIMENTO PORTLAND E HOMYSOLOGB E SULFATO DE ALUMÍNIO31

4.1. APRESENTAÇÃO	31
4.2. MATERIAIS	32
4.2.1. Solo	32
4.2.2. Metodologia de Campo	32
4.2.3. Metodologia de Laboratório.....	34
4.2.4. Ensaio de Caracterização	34
4.2.5. Análise Granulométrica por Peneiração (NP-E239)	34
4.2.6. Limite de Liquidez (NP143).....	35
4.2.7. Limite de Plasticidade (NP143)	35
4.2.8. Compactação Proctor Modificado (E197, LNEC)	35
4.2.9. Ensaio de CBR - Índice Californiano (E198, LNEC)	36
4.2.10. Emersão em água e expansão.....	36
4.2.11. Determinação do CBR	36
4.3. RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA.....	36
4.3.1. Identificação das amostras de solos	36
4.3.2. Caracterização física do solo natural.....	37
4.3.3. Caracterizações mecânicas das amostras do solo natural.....	38
4.3.4. Processo de preparo das soluções em laboratório	39
4.3.4.1. Solução de HomysoloGb a 5% em peso	39

4.3.4.2.Solução de Sulfato de Alumínio a 1% em peso.....	39
4.4.ENSAIOS DE ESTABILIZAÇÃO COM ADITIVO HOMYSOLOGB E AGLOMERANTE CIMENTO PORTLAND	40
4.4.1.Ensaio de CBR em Amostras-1 e Amostra-2	40
4.4.2.Processo de preparo das soluções em laboratório	41
4.4.2.1.Solução de HomysoloGb a 5% em peso	41
4.4.2.2.Determinação do volume da solução a 5%	41
4.4.3.Processo de ensaio de CBR.....	41
4.4.3.1.Cálculo da água a acrescentar	41
4.4.3.2.Moldagem dos provetes	42
4.4.3.2.1.Moldagem dos provetes com aditivo HomysoloGb.....	42
4.4.3.2.2.Moldagem dos provetes com aditivo HomysoloGb + Cimento.....	42
4.4.3.2.3.Moldagem dos provetes com aglomerante Cimento.....	42
4.4.4.Apresentação de resultados	43
4.5.ENSAIOS DE ESTABILIZAÇÃO COM ADITIVO HOMYSOLOGB E SULFATO DE ALUMÍNIO	43
4.5.1.Ensaio de CBR em Amostras-3 e Amostra-4.....	43
4.5.2.Processo de preparo das soluções em laboratório	44
4.5.2.1.Solução de HomysoloGb a 5% em peso	44
4.5.2.3.Determinação do volume da solução de estabilizante HomysoloGb	44
4.5.3.Processo de ensaio de CBR.....	44
4.5.3.1.Cálculo da água a acrescentar	44
4.5.3.2.Moldagem dos provetes	45
4.5.3.2.1.Moldagem dos provetes com estabilizante HomysoloGb.....	45
4.5.3.2.2.Moldagem dos provetes com aditivo HomysoloGb e Sulfato de Alumínio.....	45
4.5.4.Apresentação de resultados	45
4.6ANÁLISE DE RESULTADOS	47
4.6.1.Análise de resultados de solos com predominância da argila, estabilizadas com aditivo HomysoloGb e Cimento.....	48
4.6.1.1.Análise de resultados da Amostra-1	48
4.6.1.2.Análise de resultados da Amostra-2.....	52
4.6.2.Análise de resultados de solos com predominância da areia (estabilizadas com aditivo HomysoloGb e Sulfato de Alumínio)	56
4.6.2.1.Análise de resultados da Amostra-3.....	56
4.6.2.2.Análise de resultados da Amostra-4.....	59
Gráfico 14 – Análise comparativa entre das Expansões da Amostra-4	61
4.7.CONSUMO DO ESTABILIZANTE EM OBRA	63
4.7.1. Amostra-1	63
4.7.2. Amostra-2.....	63
4.7.3. Amostra-3.....	64
4.7.4. Amostra-4.....	64
4.8.APLICABILIDADE DE SOLOS ESTABILIZADOS COM HOMYSOLOGB	65
 CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	 67
5.1.CONCLUSÃO	67
5.2.RECOMENDAÇÃO PARA ESTUDOS FUTUROS	69
BIBLIOGRAFIA.....	71

ABREVIATURAS

LEM - Laboratório de Engenharia de Moçambique

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ANE – Administração Nacional de Estradas

MCTESTP - Ministério de Ciência, Tecnologia, Ensino Superior e Técnico Profissional

PCTM - Parque de Ciência e Tecnologia de Maluana

AASHTO – Standard Specifications for Transportation Materials and Sampling and Testing

ASTM – American Society for Testing and materials

NP – Norma Portuguesa

TMH – Standard Methods Testing Road Construction Materials

SUCS - Sistema Unificado de Classificação dos Solos

CBR - California Bearing Ratio

SN – Solo Natural

HSGB - HomysoloGb

SA- Sulfato de Alumínio

CP – Cimento Portland

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

IP – Índice de Plasticidade

IQSCTC – Impermeabilização Química de Solos Coesivos por Troca de Cátions

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Câmara de empréstimo de Beluluane Km33.....	33
Figura 2 – Processo de colheita de amostras.....	33
Figura 3 – Preparação da solução HomysoloGb.....	39
Figura 4 – Preparação da solução Sulfato de Alumínio.....	40
Figura 5 – Processo de compactação e moldagem dos provetes.....	46
Figura 6 – Processo de secagem dos provetes.....	46
Figura 7 – Processo de ensaio de CBR.....	47
Figura 8 – Pavimento estabilizado com aditivo HomysoloGb em tempo seco.....	66
Figura 9 – Pavimento estabilizado com aditivo HomysoloGb em tempo húmido	66

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Análise comparativa entre os CBR da Amostra – 1.....	49
Gráfico 2 – Análise comparativa entre as Expansões da Amostra – 1.....	49
Gráfico 3 – Análise com linha de tendência do CBR da Amostra – 1.....	51
Gráfico 4 – Análise com linha de tendência das Expansões da Amostra – 1.....	51
Gráfico 5 – Análise comparativa entre os CBR da Amostra – 2.....	53
Gráfico 6 – Análise comparativa entre as Expansões da Amostra – 2.....	53
Gráfico 7 – Análise com linha de tendência do CBR da Amostra – 2.....	55
Gráfico 8 – Análise com linha de tendência das Expansões da Amostra – 2.....	55
Gráfico 9 – Análise comparativa entre os CBR da Amostra – 3.....	57
Gráfico 10 – Análise comparativa entre as Expansões da Amostra – 3.....	57
Gráfico 11 – Análise com linha de tendência do CBR da Amostra – 3.....	58
Gráfico 12 – Análise com linha de tendência das Expansões da Amostra – 3.....	59
Gráfico 13 – Análise comparativa entre os CBR da Amostra – 4.....	60
Gráfico 14 – Análise comparativa entre as Expansões da Amostra – 4.....	61
Gráfico 15 – Análise com linha de tendência do CBR da Amostra – 4.....	62
Gráfico 16 – Análise com linha de tendência das Expansões da Amostra – 4....	62

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Índice de Plasticidade.....	17
Equação 2 – Índice de Grupo.....	19
Equação 3 – Percentagem da expansão.....	23
Equação 4, 5 – Volume da Solução HSGB.....	26
Equação 6 – Volume da solução SA.....	28
Equação 7 – Percentagem do aumento de CBR.....	47
Equação 8 – Percentagem da redução da Expansão.....	47

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de aditivos.....	13
Tabela 2 – Fração Granulométrica.....	16
Tabela 3 – Localização do Índice de Plasticidade.....	17
Tabela 4 – Sistema Unificado de Classificação.....	18
Tabela 5 – Classificação de Solos para fins Rodoviário.....	20
Tabela 6 – Energia de Compactação.....	21
Tabela 7 – Valores de CBR a considerar nos cálculos.....	22
Tabela 8 – Proveniência dos solos para o estudo.....	32
Tabela 9 – Identificação das amostras de solos em estudo.....	37
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de Limites de consistência e granulometria.....	37
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de compactação, CBR e expansibilidade.....	38
Tabela 12 – Dados da amostra -1 e 2.....	40
Tabela 13 – Resultado de ensaio de CBR e Expansão da Amostra – 1 e 2.....	43
Tabela 14 – Dados da amostra – 3 e 4.....	43
Tabela 15 – Resultado de ensaio de CBR e Expansão da Amostra – 3 e 4.....	45
Tabela 16 – Resultados comparativos CBR e Expansão da Amostra – 1.....	48
Tabela 17 – Resultados comparativos CBR e Expansão da Amostra – 2.....	52
Tabela 18 – Resultados comparativos CBR e Expansão da Amostra – 3.....	56
Tabela 19 – Resultados comparativos CBR e Expansão da Amostra – 4.....	60

SUMÁRIO EXECUTIVO

Autor:	António Pedro dos Santos Arrone
Grau Académico:	Licenciatura em Engenharia Civil
Título:	Estudo de Aplicabilidade de Solos Estabilizados com Aditivos HomysoloGb e Sulfato de Alumínio em Estradas de Baixo Volume de Tráfego
Universidade:	Politécnica
Faculdade:	Escola Superior de Gestão Ciência e Tecnologia
Supervisor:	Prof. Doutor Eng. José Francisco Rufino Diogo
Data:	30 de Junho de 2017
Palavras-Chave:	Estabilização de Solos, Aditivo HomysoloGb, Aglomerante Cimento Portland, Reagente Sulfato de Alumínio, Ensaio de CBR e Expansão.

Nos últimos anos, houve um aumento significativo de obras de construção e reabilitação de estradas em Moçambique, havendo um expressivo impacto económico e ambiental nos estaleiros de obras de estradas. Em condições normais, tanto a obra em si quanto a extracção de materiais virgens e granulares, causam impacto na natureza e são de elevados custos de transporte. Nem sempre o solo natural apresenta características técnicas suficientes para atender a um determinado fim, sendo nestes casos necessária a sua substituição ou uma intervenção a fim de melhorar suas características físico-mecânicas.

O presente trabalho de investigação tem como objectivo principal a análise do comportamento mecânico (Índice de Suporte Califórnia e Expansão) de solos quando estabilizados com aditivos HomysologGb e coadjuvado com aglomerante Cimento Portland e ou reagente/catalisador Sulfato de Alumínio, que consiste na impermeabilização química de solos coesivos por troca de catiões.

A metodologia utilizada irá envolver a exploração de conteúdo bibliográfico, pesquisas relacionadas e descrição de factores que compreendem as acções do estudo, levantamento de dados e informações através de consultas, e a lógica de investigação dedutiva com base no que será apurado dentro do estudo, correlacionado as informações e os métodos de conduta direccionados para o melhoramento de características físicas-mecânicas dos solos para fins rodoviário, trazendo de forma significativa sustentação a pesquisa relativa a tecnologias alternativas na construção de estradas de baixo custo.

Na presente investigação para além dos conteúdos relativos ao tópico acima descrito, será ainda apresentado um estudo de caso, designado: Estudo de aplicabilidade de solos estabilizados quimicamente com aditivos HomysoloGb e coadjuvantes Cimento Portland e ou Sulfato de Alumínio em estradas de baixo volume de tráfego.

O Estudo de Caso irá providenciar uma avaliação do desempenho do aditivo HomysoloGb e seus adjuvantes nos solos bem apresentar comparação e análise dos resultados, análise das influências dos diferentes tipos de solos; Irá ainda apresentar análise dos resultados obtidos e verificar a viabilidade técnica do emprego deste aditivo nas obras de construção de estradas das regiões de estudo.

O estudo pretende contribuir com os resultados para a formação de um banco de dados geotécnicos associados à estabilização de solos utilizando aditivo HomysoloGb e adjuvante Cimento Portland e ou Sulfato de Alumínio.

CAPITULO I – METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO:

“Temos considerado o solo apenas como suporte de uma obra, ao assumir-se universalmente como material de construção, e, deste modo, sendo directamente utilizado na construção de obras, como por exemplo, em aterros, na construção de barragens, rodovias e aeroportuárias, etc. Nesses casos como em outros, o solo deverá satisfazer a determinadas exigências requeridas pelas especificações apropriadas. Quando não cumpre com os requisitos, o solo deverá ser submetido a um tratamento adequado, de modo a satisfazer as características e propriedades que permitam a sua utilização.” (CAPUTO, 1978, p. 308)

Em obras de pavimentação, o solo que não atende as especificações e normas deve ser removido e substituído por outro que atenda. Quando há necessidade deste procedimento, acarreta custos adicionais à obra, bem como ao meio ambiente, pois requer a necessidade de câmara de empréstimo de material novo, quando não há disponibilidade ao longo do desenvolvimento do traçado da estrada, fato que implica em licença ambiental para exploração da câmara de empréstimo.

Desta forma, cada vez mais tem-se desenvolvido novos produtos que quando combinados aos solos, melhoram as suas qualidades e propriedades, para seu uso específico. Cabe ao Engenheiro Civil, discernir e especificar o uso destes produtos, uma vez comprovado seu resultado positivo.

O presente trabalho visa responder, por meio de ensaios de caracterização mecânica, se o uso de estabilizantes químicos atribui ao solo estudado enriquecimento suficiente em suas propriedades mecânicas, tornando-o capaz de ser usado em obras de pavimentação de estradas. Pretende-se adicionalmente fazer uma análise do efeito de estabilização de solos com aditivos HomysoloGb e seus adjuvantes Cimento Portland e ou Sulfato de Alumínio influência da economia do custo das obras e conseqüentemente na melhoria da vida das populações nas zonas de difícil devido a melhoria que pode ser na construção de estradas de acesso a baixo custo.

Para o efeito, vai se conduzir uma investigação baseada no paradigma fenomenológico de carácter exploratório, fazendo consultas para se obter o grau de percepção das partes envolvidas

neste projecto, suportadas por leituras bibliográficas que servirá de “*background*” para melhor compreensão, para que, de forma mais efectiva possa aumentar o conhecimento nesta área ainda por explorar com eficiência no nosso país.

Moçambique é um país vasto e pouco povoado, cuja principal actividade económica é a agricultura. De acordo com a Administração Nacional de Estradas (ANE), o transporte rodoviário é o principal modo de transporte e garante a movimentação de cerca de 10% de carga e 90% de passageiros e constitui o meio de acesso aos restantes modos de transporte. Como consequência, no País, o sector de transportes tem-se esforçado bastante ultimamente no sentido de desenvolver investimentos na melhoria de infra-estruturas de transporte com capacidade para atender a demanda de carga que aumenta de forma galopante, e a estrutura do pavimento deve ser construída de tal modo que que suporta tal tráfego. Para isso o material mais utilizado na composição da estrutura do pavimento de estradas, é o granular ou pedra dura de maior resistência. Contudo, cada vez mais se torna difícil recorrer-se ao uso da pedra pela ausência em determinadas regiões do país, ou mesmo devido o seu elevado custo à obra devido a distância de transporte.

Assim, impõe-se a necessidade da busca de soluções alternativas de construção de estradas, que permitam usar os materiais pobres existentes localmente no lugar de uso de materiais extraídos nas câmaras de empréstimos distantes do traçado da obra de estrada. Uma das alternativas é a estabilização química dos solos, que cada vez mais está sendo estudada e desenvolvida no mundo, cuja prática tem melhorado a qualidade dos solos, e conferindo aos mesmos melhorias significativas da sua expansão, suporte e impermeabilização, o que consequentemente tem resultado no ganho da economia, qualidade, e rapidez de execução.

A proposta desta pesquisa é trazer contribuições que possam oferecer soluções alternativas de construção de estradas de baixo volume de tráfego, considerando os aspectos de economia, flexibilidade, qualidade e durabilidade, além de melhorar as redes viárias existentes.

O Laboratório de Engenharia de Moçambique (LEM) tem desenvolvido pesquisas relacionadas à estabilização de solos mecanicamente e quimicamente com cal e cimento, buscando opções para

serem utilizados em estradas rurais e urbanas atendendo a critérios técnicos, económicos e ambientais.

Neste sentido, no âmbito de memorando de entendimento entre o Ministério de Ciência, Tecnologia, Ensino Superior e Técnico Profissional (MCTESTP) através do seu Parque de Ciência e Tecnologia de Maluana (PCTM), pretendem levar a cabo pesquisas relativas a tecnologias alternativas na construção de estradas de baixo custo. É neste contexto que se enquadra o trabalho de investigador do candidato.

1.2. O PROCESSO DE INVESTIGAÇÃO

O processo de investigação a ser seguido nesta obra, de acordo com Hussey & Hussey (1997:52), será no âmbito do paradigma fenomenológico de carácter exploratório. Para tal, seguir-se-á a seguinte estrutura na investigação.

- Identificação do tópico a ser investigado;
- Definição do problema a ser investigado;
- Determinação de como conduzir a investigação;
- Recolha de dados resultantes da investigação;
- Análise e interpretação de dados obtidos da investigação;
- Escrever o relatório final.

1.3. O PROBLEMA A SER INVESTIGADO

No quotidiano, temo-nos deparado com insucesso de muitas obras devido grande parte ao factor qualidade dos materiais. Face a este panorama, o Governo de Moçambique têm vindo a adoptar mecanismos para estudos de investigação para melhoramento da qualidade dos materiais, servindo-se e aproveitando as novas tecnologias. Não obstante, alguns projectos de construção de estradas, nem sempre o solo natural encontrado no traçado apresenta características suficientes para atender as especificações técnicas do projecto, sendo nestes casos necessária a sua substituição ou uma intervenção a fim de melhorar suas características físico-mecânicas e a sua substituição implica em aumento dos custos de construção da obra como é o caso da remoção do

material, extracção de materiais de outras áreas e que muitas vezes em locais distantes, aumento das distâncias de transporte e a definição e o tratamento de locais para bota-fora.

Quanto ao problema levantado, considerando os requisitos básicos na selecção dos solos apropriados para construção de estradas, pode ser formulado desta forma:

“A falta de solos apropriados ao longo do traçado das rodovias poderá influenciar no custo e qualidade das obras de construção em Moçambique”

1.4. A PERGUNTA A INVESTIGAR E AS HIPÓTESES A CONSIDERAR

O estado actual das empreitadas obriga aos produtores de materiais de construção no geral a considerar o factor qualidade de produção como sendo um dos factores chave do sucesso das obras de construção. Emerge desta forma, uma necessidade urgente dos produtores encararem como um dos pilares de crescimento sustentável das infra-estruturas em Moçambique. Assim a análise dos resultados está fundamentada numa síntese crítica, para responder à pergunta de pesquisa:

“Será que a falta de solos apropriados ao longo do traçado das rodovias, realmente proporciona o custo e a qualidade das obras de construção de estradas em Moçambique?”

1.4.1. As Hipóteses H0 e H1

As hipóteses foram formuladas como abaixo se indica:

(H0): A falta de solos apropriados ao longo do traçado das rodovias não é determinante no custo e qualidade das obras de construção de estradas em Moçambique.

(H1): A falta de solos apropriados ao longo do traçado das rodovias é determinante no custo e qualidade das obras de construção de estradas em Moçambique

1.4.2. As perguntas investigativas

De acordo com o problema a ser investigado, com a pergunta e com as hipóteses colocadas, poder-se-á formular as seguintes perguntas investigativas que servirão de suporte para uma melhor compreensão do assunto:

- A disponibilidade e a qualidade dos solos influenciam no custo e qualidade das estradas em Moçambique?
- A disponibilidade de recursos humanos qualificados influencia na selecção dos solos para construção de estradas em Moçambique?
- O uso ou não de tecnologias e mecanização nas actividades de produção dos solos estabilizados com aditivos químicos, condiciona a qualidade das estradas?
- Qual será a opinião dos construtores em relação a qualidade dos solos encontrados ao longo do traçado de estradas em Moçambique?
- Os programas do Governo condicionam o uso de aditivos químicos para estabilização de solos em projecto de estradas?
- Até que ponto a ausência de controlo de qualidade ao nível das empreitadas, por parte do laboratório de Engenharia de Moçambique influencia negativamente na qualidade das obras de estradas?
- Até que ponto a falta de políticas claras de normalização da produção de solos estabilizados com aditivos químicos influenciam na qualidade das estradas em Moçambique?

1.5. METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO

O presente trabalho de investigação será desenvolvida no âmbito de estudos laboratoriais baseada na estabilização de solos com aditivos HomysoloGb e adjuvantes Cimento Portland e ou Sulfato de Alumínio, e posteriormente será conduzido para as áreas de construção de estradas, no sentido de se obterem uma secção experimental para o monitoramento de forma a recolher informações sobre o impacto dos resultados que poderá proporcionar a qualidade das obras de construção de estradas em Moçambique.

1.6. CONSTRANGIMENTOS PREVISTOS NA INVESTIGAÇÃO

Hussey & Hussey (1997:129) define como limitação do trabalho de investigação as restrições que se encontram durante o processo de investigação, e define como delimitação as fronteiras em que o trabalho de investigação será conduzido. No presente trabalho, as limitações do processo de investigação são os constrangimentos encontrados, nomeadamente a impossibilidade de se obter informação correcta a partir das entrevistas, a falta de bibliografia pertinente ao estudo. O factor de “bias” também será elevado, pois algumas das pessoas não irão dizer objectivamente a sua opinião sobre o tópico em estudo, motivando a obtenção de dados com baixo nível de fiabilidade. Como em todos os trabalhos de investigação, algumas limitações e constrangimentos podem surgir dificultando a colecta de dados e informação, sendo tipicamente os mais relevantes os seguintes:

1.6.1. As limitações da Pesquisa

- Aplicação do estudo em solos provenientes de apenas uma ou duas províncias de Moçambique, devido ao escasso meio financeiro para se fazer deslocar a todas as províncias do país;
- Um número reduzido de amostragens de solos, devido a pouca abertura para o desenvolvimento do estudo no seio dos laboratórios de ensaios;
- Quantidades limitadas dos aditivos HomysoloGb e seus adjuvantes Cimento Portland e Sulfato de Alumínio, factor determinante para realização de ensaios com menor número de amostragens;
- Não foi possível ampliar o estudo para outras entidades devida as entraves apresentadas nos outros laboratórios para a disponibilização do espaço físico e meios necessárias para o estudo, por as várias entidades contactadas considerá-las de natureza não lucrativa;
- Falta de algumas bibliografias credíveis para a consulta e suporte ao trabalho;
- Fornecimento de informação incompleta ou irreal por parte dos visados, criando-se lacunas ao processo de investigação.

1.6.2. As delimitações da Pesquisa

- Esta pesquisa centrou-se no estudo da análise de solos estabilizados quimicamente com aditivos HomysoloGb e adjuvantes Cimento Portland e ou Sulfato de Alumínio para sua

aplicabilidade em projectos de construção de estradas e os pressupostos teóricos serão aplicados na análise de resultados de alguns solos predominantemente locais.

- Optou-se por analisar nesta primeira fase, solos proveniente de câmaras de empréstimos localizadas na província da Maputo, visto que consegue-se meios para se efectivar o processo de amostragem.

1.7. COMPOSIÇÃO DOS CAPÍTULOS E SEUS CONTEÚDOS

Na elaboração deste trabalho de investigação, dividiu-se em quatro capítulos sendo a seguinte a sua estrutura e composição:

SUMARIO EXECUTIVO:

Providenciará uma breve descrição do trabalho de investigação da análise do comportamento mecânico (Índice de Suporte Califórnia e Expansão) de um solo quando estabilizado quimicamente com aditivos HomysoloGb coadjuvado com Cimento Portland e ou Sulfato de Alumínio.

CAPÍTULO 1 – O MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO:

Aborda a metodologia de investigação utilizada, e introduzindo a formulação do problema da pesquisa, a justificativa, os objectivos que o estudo se propõem a atingir e as hipóteses formuladas. Mais ainda, serão abordados os procedimentos metodológicos a utilizar e será demonstrada a relevância do tema, a delimitação do contexto do trabalho e as limitações enfrentadas para o seu desenvolvimento

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LEITURA BIBLIOGRÁFICA:

Apresenta uma abordagem do conceito do estudo de solos estabilizados quimicamente com aditivos HomysoloGb, Sulfato de Alumínio, Cimento Portland e Cal, especificações e normas de estabilização de solos com aditivos químicos, livros que retratam de técnicas e experiências renováveis na estabilização de solos, consultas na internet de principais políticas de estradas relacionadas com solos estabilizados com aditivos químicos, de forma a incutir conhecimento ao autor para a pesquisa em questão.

CAPÍTULO 3 – ESTUDO DE APLICABILIDADE DE SOLOS ESTABILIZADOS COM ADITIVOS HOMYSOLO GB

Contém o estudo do caso-1 que faz a abordagem do estudo laboratorial sobre a investigação dos solos estabilizados quimicamente com aditivos HomysoloGb e seus adjuvantes Cimento Portland e ou Sulfato de Alumínio, processo de colheita e preparação de amostras do solo que serão experimentadas; processo de submissão as amostras de solo a ensaios de caracterização a fim de determinar seus principais índices (físicos e de consistência); classificar o solo de acordo com o Sistema de Classificação para Fins Rodoviário - AASHTO; processo de submissão as amostras de solo a ensaios de compactação, CBR e expansibilidade; processo de preparação e adição do aditivo HomysoloGb e reagente/catalisador Sulfato de Alumínio e aglomerante Cimento Portland; e por último o processo de submissão as amostras de solo estabilizadas com aditivos a ensaios de CBR e expansibilidade, e estudo do caso-2 que providencia uma avaliação do desempenho do aditivo HomysoloGb e seus adjuvantes na estabilização química dos solos; comparar os resultados, analisando a influência dos diferentes tipos de solos; analisar os resultados obtidos e verificar a viabilidade técnica do emprego deste aditivo nas obras de construção de estradas das regiões de estudo; contribuir para a formação de um banco de dados geotécnicos associados à estabilização química de solos utilizando aditivo HomysoloGb e adjuvante Cimento Portland e ou Sulfato de Alumínio.

CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES:

Neste capítulo, tira-se as conclusões da investigação e as recomendações que se mostram pertinentes, a partir da avaliação dos resultados da pesquisa.

1.8. OBJECTIVOS DA INVESTIGAÇÃO

1.8.1. Objectivo geral

O objectivo geral deste trabalho de investigação visa analisar o desempenho de comportamento mecânico de solos coesivos estabilizados com o produto HomysoloGb (CBR e Expansão) de solos com predominância da fracção argila (que não possui a parcela da resistência ao cisalhamento devido à falta da fracção areia) e solos com predominância da fracção areia (com pelo menos 15% de argila, contendo a fracção areia que fornece a parcela de resistência ao

cisalhamento devido o atrito intergranular e a parcela devido à coesão e acção da fracção argila), quando estabilizado quimicamente com aditivo HomysoloGb e seus adjuvantes Cimento Portland e ou Sulfato de Alumínio com intuito de utilizá-lo em obras de construção e reabilitação de estradas em Moçambique.

Faz parte do objectivo geral a vontade do autor em poder desenvolver este tipo de investigação e poder contribuir mesmo que de forma modesta, para a apresentação de algumas opiniões sobre a problemática, conduzindo um trabalho de investigação sobre um fenómeno real, concreto e que interage com a economia do nosso país, mas podem ser resumidos nos seguintes:

- Melhorar a qualidade das estradas ao nível dos distritos;
- Melhorar o controlo das execuções das estradas;
- Sugerir medidas de melhoramento de acordo com os resultados obtidos na investigação.

1.8.2. Objectivos específicos

- Coletar e preparar amostras do solo que serão ensaiadas;
- Submeter as amostras de solo a ensaios de caracterização a fim de determinar seus principais índices (físicos e de consistência);
- Classificar o solo de acordo com o Sistema de Classificação da AASHTO;
- Submeter as amostras de solo a ensaios de compactação, CBR, expansão,
- Adicionar em uma amostra de solo a solução aditivo HomysoloGb coadjuvado com aglomerante Cimento Portland e ou reagente/catalisador Sulfato de Alumínio;
- Ensaiar as amostras após 4 dias de submersão em água, identificando suas propriedades mecânicas (CBR e Expansibilidade);
- Avaliar o desempenho do aditivo HomysoloGb na estabilização do solo;
- Comparar os resultados, analisando a influência dos diferentes tipo de solos;
- Analisar os resultados obtidos e verificar a viabilidade técnica do emprego deste aditivo nas obras de pavimentação de estrada das zonas de estudo;
- Contribuir para a formação de um banco de dados geotécnicos associados à estabilização de solos coesivos, utilizando aditivo químico HomysoloGb.

1.9. IMPORTÂNCIA DO TEMA DA INVESTIGAÇÃO

Em Moçambique a qualidade dos solos para construção de estradas é muito variável, isto, quando olhamos para as provinciais, especialmente porque em alguns casos quase todo o solo é importado de câmaras de empréstimos fora do traçado por falta de solos que satisfaçam os requisitos para uso em terraplenagens de estradas e a qualidade final do da empreitada depende muito da capacidade financeira do cliente e da sua exigência em relação ao trabalho encomendado.

A construção de estradas privilegiando o uso de solos seleccionados e o preço de transporte de movimentação de terras contribuem para o elevado custo das empreitadas e consequentemente uma fraca resposta a demanda das infra-estruturas de utilidade pública tais como estradas nacionais, municipais, urbanas assim como distritais e de entre outras.

Este trabalho de investigação poderá trazer um instrumento que tenha por objectivo contribuir para a redução do custo da construção e promover o crescimento económico e social salvaguardando a segurança e qualidade dos solos locais e consequentemente das obras de construção de infra-estruturas rodoviárias e aeroportuárias no país.

CAPÍTULO II - REVISÃO DA LEITURA BIBLIOGRÁFICA

2.1. ESTUDOS PRÉVIOS

Com vistas ao objectivo do presente trabalho, apresenta-se de forma sucinta, alguma teoria relacionada com a prática de estabilização que veio estabelecer nos dias de hoje, mais do que nunca, um estreito relacionamento com o uso racional dos solos para construção de estradas.

O presente trabalho sugere alternativas que conduzam a uma melhoria de qualidade de solos para construção de estradas, conforme as necessidades actuais, contribuindo assim para a geração de uma consciência de maior compromisso com os bons modos de melhor fazer e construir, buscando proporcionalmente vantagens socioeconómicas para o país.

O desenvolvimento deste capítulo tem a finalidade de oferecer sustentação teórica ao estudo proposto, apresentar os conceitos teóricos que servirão de base para a pesquisa. Descrevem-se a importância do estudo que consiste na estabilização química de solos com aditivo HomySoloGb e seus adjuvantes Cimento Portland e ou Sulfato de Alumínio.

2.2. DEFINIÇÕES PERTINENTES

2.2.1. Solo

“O termo solo é usado em várias acepções conforme o ponto de vista científico ou técnico, sob que é encarado, Em vias de comunicações, e segundo o Vocabulário de Estradas e Aeródromos, o solo é todo o conjunto natural de partículas que podem ser separadas por agitação em água. Os vazios entre as partículas contem água e ar, separadas ou conjuntamente. As partículas de solo serão geralmente resultado de acções físicas e químicas actuantes sobre as superfícies das rochas” (Ensaio para Controlo de Terraplenagens – CPP 524 LNEC)

O solo é um componente indispensável para diversas obras de Engenharia Civil, todavia é importante ter conhecimento do seu comportamento nas mais diversas situações. Uma característica importante e de fundamental importância que um Engenheiro Civil deve saber é que o solo quando submetido a um contacto prolongado com a água perde toda sua resistência.

2.2.2. Origem e Constituição

Os solos se formam por decomposição de rochas existentes na crosta terrestre através da acção das intempéries. “Por decomposição mecânica através de agentes como água, temperatura, vegetação e vento, formam-se os pedregulhos e areias (solos de partículas grossas) e até mesmo os siltes (partículas intermediárias) e somente em condições especiais, as argilas (partículas finas). Por decomposição química entende-se o processo em que há modificação química ou mineralógica das rochas de origem. (CAPUTO, 1996, p.14)

O principal agente é a água e os mais importantes mecanismos de ataques são a oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos da vegetação. As argilas representam o último produto do processo de decomposição. Os processos descritos acima ocorrem simultaneamente, dependendo das condições climáticas e do local um pode predominar sobre o outro.

2.2.3. Estabilização do Solo

Estabilização do solo consiste em atribuir ao mesmo capacidade de resistir às acções do clima e esforços de desgaste causados pelo tráfego, tendo em conta as situações tomadas no projecto (França, 2003). A estabilização de um solo tem a finalidade de melhorar suas propriedades físico-mecânicas contribuindo para melhor resistir às acções climáticas e aos esforços e desgaste induzidos pelo tráfego. É neste contexto que a engenharia rodoviária pode contribuir buscando avaliar as novas tecnologias dentro do âmbito sustentável-económico, a fim de se aperfeiçoar o uso dos recursos naturais existentes da forma mais racional possível.

2.2.3.1. Estabilização Mecânica

Que pode ser de dois tipos:

- Estabilização Granulométrica dos solos: consiste na mistura de dois ou mais tipos de solo com o objectivo de obter um único solo resultado dessa junção que tenha granulometria estável e resistência desejável.
- Estabilização por compactação: consiste na compactação do solo de forma mecânica usando pilões e moldes de compactação visando diminuir o volume do solo melhorando a sua resistência, permeabilidade e deformabilidade.

2.2.3.2. Estabilização Física

A estabilização física pode ser dividida em eléctrica e térmica. Segundo MARQUES (2008), a estabilização eléctrica consiste na passagem de uma corrente eléctrica pelo solo. Já a estabilização térmica, é feita por meio de congelamento, aquecimento ou termo osmose.

2.2.3.3. Estabilização Química

Segundo França (2003,p.07), a estabilização química de um solo refere-se às alterações produzidas na sua estrutura pela introdução de uma certa quantidade de aditivo, suficiente para melhorar suas propriedades físicas e mecânicas, possibilitando o seu emprego para fins de projecto. Consiste no uso de aditivos para melhorar as propriedades mecânicas e hidráulicas do solo. Para o efeito, os aditivos mais utilizados são a cal, o cimento, o asfalto ou betume, produtos químicos industrializados como cloretos e alguns ácidos.

Na tabela a baixo encontram-se alguns aditivos utilizados na estabilização de solos, podendo ser encontrados no mercado exterior.

Aditivos	Fabricante	Composição	Origem
EMC ² ®	SSPco	Bioenzima	EUA
Ecolopavi®	Idea Amazônia	Sal orgânico	Brasil
Dynacal®	Dynacal	Composto metalo-orgânico	Brasil
Vixil I®	Melbar	Lignina de madeira	Brasil
Moldenzol 43®	Gienex	Composto metalo-orgânico	Brasil
Enzymatic®	Enzymatic	Bioenzima	Austrália
DS - 328®	Dynasolo	Composto metalo-orgânico	Brasil
Rheocem 30®	Rogertec	Sílica e quartzo	Brasil
CON-AID®	CON-AID PLUS	Ácido sulfônico aromático	África do Sul
HomySoloGb®	Homy Química	Composto metalo-orgânico	Brasil
Terrazyme®	Natureplus - INC	Enzima natural	EUA
PZ Solution®®	International Enzymes INC	Bioenzima	EUA

Tabela 1 – Relação de aditivos

Fonte: BRAZZETTI, 1998 e SILVA, 2007, p.06

Os aditivos com uso destinado para reforço de solos devem satisfazer algumas condições voltadas para a questão ambiental, apesar de alguns deles sejam produzidos sem essa preocupação. Existem vários tipos de aditivos para estabilização de solos como acima se pode constatar, das quais apenas far-se-á a descrição do aditivo HomysoloGb, aglomerante Cimento Portland e Sulfato de Alumínio que serão empregues neste estudo:

2.2.4. Aditivo HomysoloGb

É um produto brasileiro empregado na estabilização e impermeabilização de solos para a construção de estradas, aterros sanitários, aeroportos, impermeabilização de fundos de tanques e lagos a baixo custos. Tem a função de actuar sobre as partículas finas do solo, aumentando a capacidade de suporte (CBR), reduzindo sua expansão e sucção, dispensando a pedra e outros agregados no processo de pavimentação.

2.2.5. Aglomerante Cimento Portland

É um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinante ou ligantes, que endurece sob acção de água, se torna uma pasta homogénea, capaz de endurecer e conservar sua estrutura, mesmo em contacto novamente com a água. Portanto, é um tipo de cimento muito utilizado na construção civil por sua resistência.

2.2.6. Reagente Sulfato de Alumínio

É um sal obtido pela reacção entre o ácido sulfúrico e o hidróxido de alumínio ou entre o mesmo ácido e o alumínio metálico. É usado para o tratamento de água, tratamento de efluentes, limpeza de piscina, manufactura de papel, decantação de partículas mais densas que a água por acção da gravidade e ajuste do pH de água, normalmente é encontrado em forma de pó mas também é possível vê-lo sob a forma líquida, e é corrosivo.

2.3. ENSAIOS LABORATORIAIS

Além das propriedades básicas do solo, existem características que, avaliadas através de ensaios laboratoriais, permitem a identificação de uma espécie de solo e são: composição granulométrica e limites de consistência. Contudo, certas propriedades simples, que não necessitando de qualquer equipamento para a sua determinação, permitem fazer uma identificação aproximada do solo no campo.

2.3.1. Amostragem

A recolha de amostras remexidas de solo para ensaios laboratoriais pode ser efectuada através de ferramentas manual tal como: pá, picareta, enxada, etc. Quando se pretende colher amostras em profundidade, pode recorrer-se à utilização de trados, manuais ou mecânicos. A quantidade de solo a recolher para a realização dos ensaios de laboratório é função do tipo de solo e do ensaio a que se destina.

2.3.2. Preparação de amostras

A técnica de preparação de amostras de solo para ensaios de caracterização, tal como são recebidas do campo, está descrito na Especificação E195 – SOLOS: Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação.

2.3.3. Análise Granulométrica

“A análise granulométrica consiste na determinação das proporções com que ocorrem em um solo as partículas de diferentes tamanhos. Entende-se por tamanho ou diâmetro de uma partícula, a menor abertura do peneiro da malha quadrada na qual a partícula pode passar. ” (SOUZA, 1980, p.68).

A análise granulométrica é representada graficamente pela curva granulométrica, quando realizado em laboratório, o ensaio de análise granulométrica consiste em duas fases: peneiramento e sedimentação.

De acordo com Pinto (2002, p.10), em cima do peso seco da amostra, o peso do material que passa em cada peneira é considerada como a percentagem passante e é representado no gráfico em função da abertura do peneiro. Esta abertura nominal é considerada como diâmetro equivalente, já que as partículas não são esféricas.

Conforme CAPUTO (1973, p.31), quando se necessita saber a distribuição granulométrica da porção mais fina do solo, ou seja, menor que 0,075 mm, baseado na Lei de Stokes, onde se estabelece uma relação entre o diâmetro da partícula e sua velocidade de sedimentação em um meio líquido de viscosidade e peso específico conhecidos.

Tipo de Solo	Diâmetro (mm)
Seixos	60 – 2,0
Areia	2,0 - 0,06
Silte	0,06 - 0,002
Argila	<0,002

Tabela 2 – Fracção Granulometria

Fonte: PEREIRA - LNEC, Lisboa 1999, v.1,p.172

2.3.4. Limites de Consistência

“Consistência refere-se ao grau de adesão entre as partículas e a resistência oferecida às forças que tendem a deformar ou romper a massa desse solo”. (TERZAGUI 1973, apud TSUTSUMI, 2008, p.14).

A humidade do solo sendo muito elevada ele se apresenta como um fluido denso e se diz no estado líquido. Com a evaporação da água ele endurece e fica com determinada humidade passando para LL (limite de liquidez).

Nestas condições ele não é mais considerado um fluido denso, porém pode ser moldado e conserva sua forma. Após isso o solo está no estado plástico. Continuando a perder humidade, o estado plástico desaparece e o solo se desmancha ao ser trabalhado, sendo denominado estado semi-sólido. Com a continuação da secagem o mesmo passa para o estado sólido.

2.3.5. Limite de Liquidez (LL)

A determinação do limite de liquidez (LL) é feita pelo aparelho Casa-grande. Este é composto por uma concha de cobre movida através de uma manivela, onde se aplicam golpes deixando a concha do aparelho cair de uma altura padrão a uma velocidade constante contra uma base fixa.

O LL é definido como o teor de humidade no qual se fecha uma ranhura feita no solo colocado sobre a concha de cobre por meio a 25 golpes em velocidade constante.

O procedimento é executado pelo menos quatro vezes com o solo em diferentes humidades. Pequenas amostras são retiradas do ponto de fechamento da ranhura, para a determinação de seu teor de humidade. A cada tentativa anota-se o número de golpes necessários para o fechamento da ranhura.

2.3.6. Limite de Plasticidade (LP)

É definido como o teor de humidade limite entre o estado plástico e o estado semi-sólido. De acordo com CAPUTO (1972, p. 62), o limite de plasticidade é determinado pelo cálculo da percentagem de humidade para qual o solo começa a se fracturar quando se tenta moldar com ele, um cilindro de 3 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento. Com o processo de rolagem da amostra cilíndrica de solo em uma placa de vidro fosco, a mesma começa a perder humidade. O Limite de Plasticidade (LP) caracteriza-se pelo momento em que a amostra começa a apresentar fissuras.

2.3.7. Índice de Plasticidade (IP)

O Índice de Plasticidade (IP) é obtido por meio da diferença entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP), e é expresso em percentagem (%):

$$IP (\%) = LL - LP$$

Equação 1 – Índice de Plasticidade

Fonte: PERREIRA - LNEC, Lisboa 1999, v.1.p.78

Estado de Comportamento			
Teor em água crescente			
Sólido	Semi-sólido	Plástico	Líquido
LR	LP		LL
IP			
0%	→	Humidade	→
			100%

Tabela 3 – Localização do Índice de Plasticidade

Fonte: LNEC, CPP524, p.40)

2.3.8. Classificação dos Solos

A classificação de um solo tem como objectivo principal saber o seu provável comportamento diante das diversas solicitações impostas.

“O objectivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista da engenharia, é o de poder estimular o provável comportamento do solo, ou pelo menos orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema” (PINTO, 2002, p. 51).

São encontrados diversos sistemas de classificação, porém para interesse da engenharia de estradas estão baseados nas características dos grãos que constituem o solo. Estes sistemas de classificação geralmente têm como parâmetro a granulometria e os limites de consistência do solo.

Veremos a seguir os dois sistemas de classificação mais empregados (Sistema Unificado de Classificação dos Solos e Sistema de Classificação para Fins Rodoviário).

2.3.9. Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS

O SUCS foi proposto em 1948 por Arthur Casagrande e adaptado pelo Bureau of Reclamation, pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano e sucessivamente por outras organizações do país. Neste sistema, os solos se dividem em três tipos principais:

- Granulometria grossa;
- Granulometria fina;
- Solos orgânicos.

Os solos estão distribuídos em 6 grupos, representados como: pedregulhos (G), areias (S), siltes inorgânicos e areias finas (M), argilas inorgânicas (C), e siltes orgânicos e argilas (O). Cada grupo é então dividido em subgrupos de acordo com suas propriedades índices mais importantes. Os pedregulhos e as areias com pouco ou nenhum material fino são subdivididos de acordo com suas propriedades de distribuição granulométrica dentro de bem graduado (GW e SW) ou uniforme (GP e SP).

Classificação geral	Tipos principais	Símbolos
Solos grossos (menos que 50% passando na #200)	Pedregulho gravel Areia ou solos arenosos	GW, GP, GC e GM SW, SP, SC e SM
Solos finos (mais de 50% passando na #200)	Silte (M) ou argila (C)	Baixa compressibilidade (LL < 50) ML, CL Alta compressibilidade (LL > 50) MH, CH
Solos altamente orgânicos	Turfa	Pt

Tabela 4 – Sistema Unificado de Classificação

Fonte: TSUTSUMI, 2008

2.3.10. Sistema de Classificação para Fins Rodoviário (AASHTO)

A classificação para Fins Rodoviário, que é antigo e criada por Terzaghi e Hogentogler, em 1928, desenvolvida para a aplicação em construção de estradas e classifica os solos em termos de aplicabilidade nesse tipo de estruturas, reúne os solos em grupos e subgrupos em função de:

- Granulometria;
- Limites de Consistência (LL e LP);
- Índice de grupo.

Para se fazer a classificação dos solos através da tabela 4, o grupo do solo é determinado por processo de eliminação, da esquerda para a direita no quadro de classificação. Partindo sempre da esquerda, o primeiro grupo com o qual os valores do solo ensaiado coincidirem indicará a classificação.

Para a determinação do índice de grupo levam-se em consideração os limites de consistência do solo (LL e LP) e a percentagem do material fino passante na peneira nº 200. Os valores de IG podem variar de 0 a 20 e é obtido através da fórmula:

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd$$

Equação 2 – Índice de Grupo

Fonte: E240 LNEC – Classificação para fins rodoviários

Onde:

a - percentual de solo passante na peneira nº 200 menos 35; se o percentual de solo for maior que 75 adopta-se 75, se for menor que 35, adopta-se 0; a varia de 0 a 40.

$$a = pp\#200 - 35\%$$

b - percentual de solo passante na peneira nº 200 menos 15; se o percentual de solo for maior que 55 adopta-se 55, se for menor que 15, adopta-se 0; b varia de 0 a 40.

$$b = pp\#200 - 15\%$$

c - percentual correspondente ao limite de liquidez menos 40; se o limite de liquidez for maior que 60 adopta-se 60, se for menor que 40, adopta-se 0; c varia de 0 a 20.

$$c = LL - 40\%$$

d - percentual correspondente ao índice de plasticidade menos 10; se o índice de plasticidade for maior que 30 adopta-se 30, se for menor que 10, adopta-se 0; d varia de 0 a 20.

$$d = LP - 10\%$$

Tipos de solos	Material granular (35% ou menos pp #200 ASTM)							Material Silto-argiloso (mais de 35% pp #200 ASTM)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
Subgrupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6	
Granulometria												
N°10	50máx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
N°40	30máx	50máx	51mín	-	-	-	-	-	-	-	-	
N°200	15máx	10máx	10máx	35máx	35máx	35máx	35mín	36mín	36mín	36mín	36mín	
pp #40												
LL	-	-	40máx	41mín	40máx	41mín	40máx	41mín	40máx	41mín	40máx	41mín
IP	6máx	NP	10máx	10máx	11mín	11mín	10máx	10máx	11mín	11mín	10máx	11mín
IG	0	0	0	0	4máx	8máx	12máx	16máx	20máx			
Tipos dos materiais	Calhau, seixo e areia		Areia fina	Seixos e areia Siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos		
Comportamento	Excelente a bom					Regular a muito mau						

Tabela 5 – Classificação de Solos para Fins Rodoviário (AASHTO)

Fonte: LNEC, E240

2.3.11. Compactação dos Solos

“Entende-se por compactação de um solo, o processo manual ou mecânico que visa reduzir o volume de seus vazios, e assim, aumentar sua resistência, tornando-o mais estável.” (CAPUTO, 1988, p.172).

As terras colocadas em obra sem qualquer compactação, portanto, com elevado índice de vazios, são facilmente susceptíveis de sofrer assentamento bem como de serem atravessadas pela água, podendo este originar o próprio arraste das partículas mais finas, conduzindo por vezes ao colapso da obra. Além disso, a capacidade do solo para suportar as cargas será menor. Estes factores levaram à necessidade de compactar o solo, embora essa técnica seja bastante antiga. Assim, até ao aparecimento da primeira máquina de compactação, os antigos utilizavam rolos de pedras e animais, principalmente carneiros, para efectuarem as obras.

2.3.12. Ensaio de Compactação

Com o ensaio, pretende-se determinar os parâmetros ideais da compactação, que assegurarão as propriedades necessárias para o projecto. Isso se traduz em determinar qual é a humidade que, se requer, com uma energia de compactação dada, para conseguir a densidade seca máxima que se pode ter para um determinado solo.

Conforme CAPUTO (1988, p.175), o ensaio original para a determinação da humidade óptima e do peso específico máximo de um solo é o ensaio de Proctor, proposto em 1933, pelo engenheiro americano que lhe deu o nome.

Características	Energia de Compactação		
	Normal	Intermédia	Modificado
Pilão	Leve	Pesado	Pesado
Molde	Pequeno	Grande	Grande
Nº de camadas	3	5	5
Nº de Pancadas/camada	55	25	55

Tabela 6 - Energia de compactação

Fonte: LNEC E197

2.3.13. Controle de Compactação no Campo

O controlo da compactação em campo é de extrema importância, haja vista que este controlo tem como principal objectivo comprovar se as propriedades do solo compactado estão obedecendo aos padrões das especificações técnicas.

Para se ter um bom controlo de compactação do solo em campo, deve-se atentar aos seguintes aspectos:

- Tipo de solo;
- Espessura da camada;
- Número de passadas;
- Tipo de equipamento;
- Humidade do solo;
- Grau de compactação alcançado.

Se as especificações para grau de compactação não forem atendidas, o solo deverá ser removido e uma nova compactação será efetuada.

2.3.14. Ensaio de CBR (Índice Californiano)

O CBR é uma medida convencional aferidora da capacidade de suporte dum solo que, introduzida em abacos obtidos experimentalmente, permite determinar a espessura necessária dos pavimentos flexíveis.

O ensaio consiste em medir a força necessária para que um pistão normalizado penetre no solo até uma certa profundidade, com determinada velocidade. O CBR é uma força requerida para o pistão penetrar até essa profundidade, expressa em percentagem da força necessária para o mesmo pistão penetrar, até à mesma profundidade e com a mesma velocidade, num provete normalizado. Em regra usa-se as penetrações de 2,5 mm e 5,0 mm.

O valor do ensaio de CBR é em percentagem, e utilizado para dimensionamento de pavimentos flexíveis. A tabela conte os limites de CBR de laboratório de alguns solos típicos, e os valores em reais recomendados para determinados das camadas de pavimento, segundo a experiência francesa.

Designação de solo		CBR real	CBR a considerar nos cálculos
Seixo limpa bem graduado		> 40	20
Seixo limpa mal graduado		> 30	20
Seixo siltoso	De IP > 7	>40	20
	De IP <7	>20	10
Seixo argiloso		>20	10
Areia limpa bem graduada		>20	10
Areia limpa mal graduada		>10	6 á 8

Tabela 7 – Valores de CBR a considerar nos cálculos

Fonte: PERREIRA - LNEC, Lisboa 1999, v.1.p.193

2.3.15. Expansibilidade

“Expansibilidade é conhecida de todos quantos trabalham com solos a variação volumétrica que certos solos argilosos apresentam quando varia o seu teor em água. Com efeito, pela absorção de

água origina-se um aumento de volume que, pode, com certos tipos de solo, assumir importantes proporções, e pela secagem produzir-se o fenómeno inverso, observando-se retrações tanto maior quanto maior tiverem sido as expansões constituem. Este fenómeno tem consequências práticas prejudiciais” (PEREIRA - LNEC, 1999, p.183). A determinação da expansão é feita através do extensómetro, com os mesmos provetes que serão usados para determinação do CBR. A expansão relativa, expressa em percentagem, é determinada pela expressão:

$$\% \text{ Expansão} = (L_f - L_i) / H \times 100$$

Equação 3 – Percentagem da expansão

Fonte: E198 LNEC - Ensaio de CBR

Onde:

L_f - leitura do defletómetro da expansão no fim do período de imersão

L_i - leitura do mesmo defletómetro no início do período de imersão

H - altura do provete antes da imersão.

CAPÍTULO III – METODOLOGIA DE PREPARAÇÃO DO ESTABILIZANTE DE SOLOS HOMYSOLO GB

3.1. ADITIVO HOMYSOLOGB

HomysoloGb é um produto brasileiro fabricado pela Homy Química, empregado na estabilização e impermeabilização de solos para a construção de estradas, aterros sanitários, aeroportos, impermeabilização de fundos de tanques e lagos a baixo custos.

3.1.1. Função do HomysoloGb

Actuar sobre as partículas finas do solo, aumentando a capacidade de suporte (CBR), reduzindo sua expansão, dispensando a pedra e outros agregados no processo de pavimentação.

3.1.2. Vantagens da utilização do HomysoloGb

- Emprego do solo local: não utiliza pedra ou qualquer outro tipo de agregado, reduzindo inclusive os custos com o transporte.
- Rapidez na execução: 1.600 a 2.000 m² de produção por dia (obras entregues em menos tempo).
- Menores custos.
- Facilidade de aplicação: menor mão-de-obra.
Gera um aumento considerável no CBR de alguns solos, proporcionando uma óptima resistência e impermeabilização.
- Facilidade de transporte e armazenamento (um tambor de HomysoloGb substitui 76 caminhões de pedra ou cascalho).
- É ideal para a preparação de bases, sub-bases e reforços de sub-leitos para estradas, ruas e avenidas, pátios de descargas e galopões industriais, aeroportos, estacionamentos, aterros sanitários, lagoas ou tanques de aeração, etc.
- Economia (1 tambor de 200 litros de HomysoloGb faz de 700 a 1.000 m² de estrada).

3.1.3. Característica do Solo recomendado para uso do HomysoloGb

De acordo com o fabricante, a eficiência de HomysoloGb depende de alguns factores, tais como: tipo de solo a ser empregado; estrutura do solo; composição química; composição mineralógica. Existem dois tipos bem distintos de solos recomendados dos quais passo a citar:

- 1) Solo com predominância da fracção argila (tipo A-5, A-6 e A-7-5 e A-7-6, que não possui a parcela da resistência ao cisalhamento devido à falta da fracção areia), este solo, para seu emprego em pavimentos destinado a um trânsito mais intenso deve ser tratado com estabilizante HomysoloGb na proporção de 1:1.500 em peso, mais aglomerante Cimento Portland ou Cal Hidratada Seca com dosagens de 1 a 3% em peso, obtendo-se desta forma resistências compatíveis com qualquer densidade de trafego.
- 2) Solo com predominância da fracção areia (tipo A-2-4 a A-2-7, com pelo menos 15% de argila, contendo a fracção areia que fornece a parcela de resistência ao cisalhamento devido o atrito intergranular e a parcela coesão devido à acção da fracção argila), este solo deve ser impermeabilizado com a aplicação do estabilizante HomysoloGb na proporção de 1:1.000 em peso e mais um reagente/catalisador, o Sulfato de Alumínio na proporção de 1:5.000 em peso. Estes solos areno argilosos impermeabilizados geralmente atingem um CBR acima de 80%, sendo indicado o seu uso para qualquer tipo de estrada ou pavimentos de aeroportos.

3.1.4. Tipos de estabilização química de solos com HomysoloGb

- HomysoloGb + Aglomerante Cimento Portland;
- HomysoloGb + Aglomerante Cal Hidratada Seca;
- HomysoloGb + Aglomerante Cal Hidratada Húmida;
- HomysoloGb + Reagente/Catalisador Sulfato de alumínio;

3.1.5. Procedimento para determinação do CBR

1) Ensaio de determinação da densidade máxima aparente seca e teor óptimo de humidade: Este ensaio deverá obedecer as orientações da norma LNEC E197 com a energia do Proctor Modificado recomendadas pelas especificações técnicas de estradas em Moçambique, correspondente a 55 pancadas por camadas de 5.

2) Ensaio de determinação do CBR, em amostras naturais (sem estabilizante): Uma vez determinada a humidade óptima da amostra do solo natural, proceder ao ensaio de determinação do CBR pela norma E198 LNEC, com a mesma energia do ensaio de compactação.

3) Ensaio de determinação de CBR, em amostras estabilizadas quimicamente com HomysoloGb: Sabendo-se que a resistência total à penetração de um solo deve-se a

somatório da resistência devido ao atrito intergranular e a devido coesão, receberão os solos tratamentos diferentes, segundo a predominância, e, sua composição granulométrica, da areia e da argila.

3.1.6. Procedimento de preparo das soluções de trabalho

3.1.6.1. Solução de HomySoloGb a 5% em peso

1- Pesa-se numa balança com sensibilidade de 0,01g, a quantidade de 50,0g de HomySoloGb em uma proveta de 1.000ml limpa, com graduação de 10ml.

2- Adiciona-se água destilada limpa, agitando levemente para a completa homogeneização, até a marca de 1.000ml.

3.1.6.2. Solução de Sulfato de Alumínio a 1% em peso

1- Pesa-se numa balança com sensibilidade de 0,01g, a quantidade de 10,0g de Sulfato de Alumínio em uma proveta de 1.000ml limpa, com graduação de 10ml.

2- Adiciona-se água destilada limpa, agitando levemente para a completa homogeneização, até a marca de 1.000ml.

No caso em que a solução for preparada com água destilada, pode ser utilizada após o ensaio, caso contrário, a solução é de ser descartada, pois que os sais minerais em solução da água reagirão com HomysoloGb, provocando o turvamento da solução e perda de sua eficácia.

3.1.7. Ensaio com solos com predominância da fração argila

3.1.7.1. Solução de HomysoloGb a 5% em peso

1- O volume de Solução de HomysoloGb a 5% em peso, a adicionar à amostra, é calculado pela fórmula geral:

$$V_{\text{sol HSGB}} = M_s / D (5\%) = 20 \times M_s / D$$

Equação 4 – Volume da solução HSGB

Fonte: ROESSLER, 2016, Manual de laboratório IQSCTC

Sendo:

M_s - a massa de solo seco da amostra,

D - a dosagem recomendada, geralmente 1:1.500 em relação ao peso seco da amostra (resultando em 1,0Kg de estabilizante por metro cúbico compactado, de onde pesou-se uma amostra de 6,0Kg e adicionou-se 6,000g / 1:1.500, ou 4,0g de estabilizante, devido à imprecisão para trabalhar com quantidades tão pequenas, usa-se a solução de trabalho de HomysoloGb a 5%).

- 2- Colocar este volume de solução em uma proveta graduada;
- 3- Calcular a quantidade de água a adicionar à amostra para obtenção da umidade ótima de moldagem;
- 4- Adicionar água à proveta com a solução de HomysoloGb até atingir o volume calculado em 3.

3.1.8. Aglomerante Cimento Portland ou Cal Hidráulica Seca

Geralmente indicados na proporção de 1% a 3% em relação à massa do solo seco da amostra, sua quantidade é determinada pelo produto da massa de solo da amostra pela dosagem em percentagem, como segue:

$$M_{cp} \text{ (ou } M_{chc}) = M_s / D$$

3.1.8.1. Moldagem dos Provetes

- 1- Adicionar a amostra preparada, a quantidade de aglomerante determinada nos itens b, homogeneizar bem,
- 2- Adicionar a solução HomysoloGb com a água necessária para obtenção da umidade ótima, homogeneizar bem,
- 3- Proceder à moldagem.

3.1.9. Ensaio com solos com predominância da fração areia

3.1.9.1. Solução de HomysoloGb a 5% em peso

1- O volume de solução de HomysoloGb a 5%, adicionada à amostra, é calculado pela fórmula geral:

$$V_{sol \text{ HSGB}} = (M_s / D) / (5\%) = 20 \times M_s / D$$

Equação 5 – Volume da solução HSGB

Fonte: ROESSLER, 2016, Manual de laboratório IQSCTC

Sendo:

M_s - Massa de solo seco da amostra

D - Dosagem recomendada, geralmente 1:1.5000 em relação ao peso seco da amostra

Onde:

$$V_{\text{Sol HSGB}} = M_s / 50$$

2- Calculada a quantidade total de água a adicionar à amostra para obtenção da humidade óptima de moldagem dos provetes de CBR, dividir em duas partes iguais.

3- Coloca-se a solução HomySoloGb a 5% (calculada em 1) em uma proveta graduada, e adiciona-se água até completar o volume correspondente à metade da quantidade total de água a adicionar para obtenção da humidade óptima.

3.1.10. Solução de Sulfato de Alumínio a 1%

1- O volume de solução de Sulfato de Alumínio a 1%, adicionada à amostra, é calculado pela fórmula geral:

$$V_{\text{Sol SA}} = (M_s / D) / (1\%) = 100 \times M_s / D$$

Equação 6 – Volume da solução SA

Fonte: ROESSLER, 2016, Manual de laboratório IQSCTC

Sendo:

M_s - Massa de solo seco da amostra

D - Dosagem recomendada, geralmente 1:1.5000 em relação ao peso seco da amostra

Onde:

$$V_{\text{Sol SA}} = M_s / 50$$

2- Colocar a solução de Sulfato de Alumínio a 1% (acima calculada) em uma proveta graduada, e adiciona-se água até completar o volume correspondente à metade da quantidade total de água a adicionar para obtenção da humidade óptima.

3.1.10.1. Moldagem dos Provetes

1- Adicionar a amostra preparada, o conteúdo da proveta com a solução HomySoloGb, homogeneizar bem,

2- Adicionar o conteúdo da proveta de solução de sulfato de alumínio, homogeneizar bem,

3- Proceder à moldagem.

3.1.10.2. Secagem dos provetes e imersão para saturação

Visando reproduzir no laboratório as condições de trabalho dos solos na estrutura dos pavimentos, deve-se reduzir a quantidade de água contida na amostra em 40%, conforme observado em verificações de campo. Determinada a massa de água contida no provete, calcula-se a massa correspondente a 40% deste teor, estabelecendo-se assim a redução de peso desejado, com uma tolerância permitida de $\pm 5\%$.

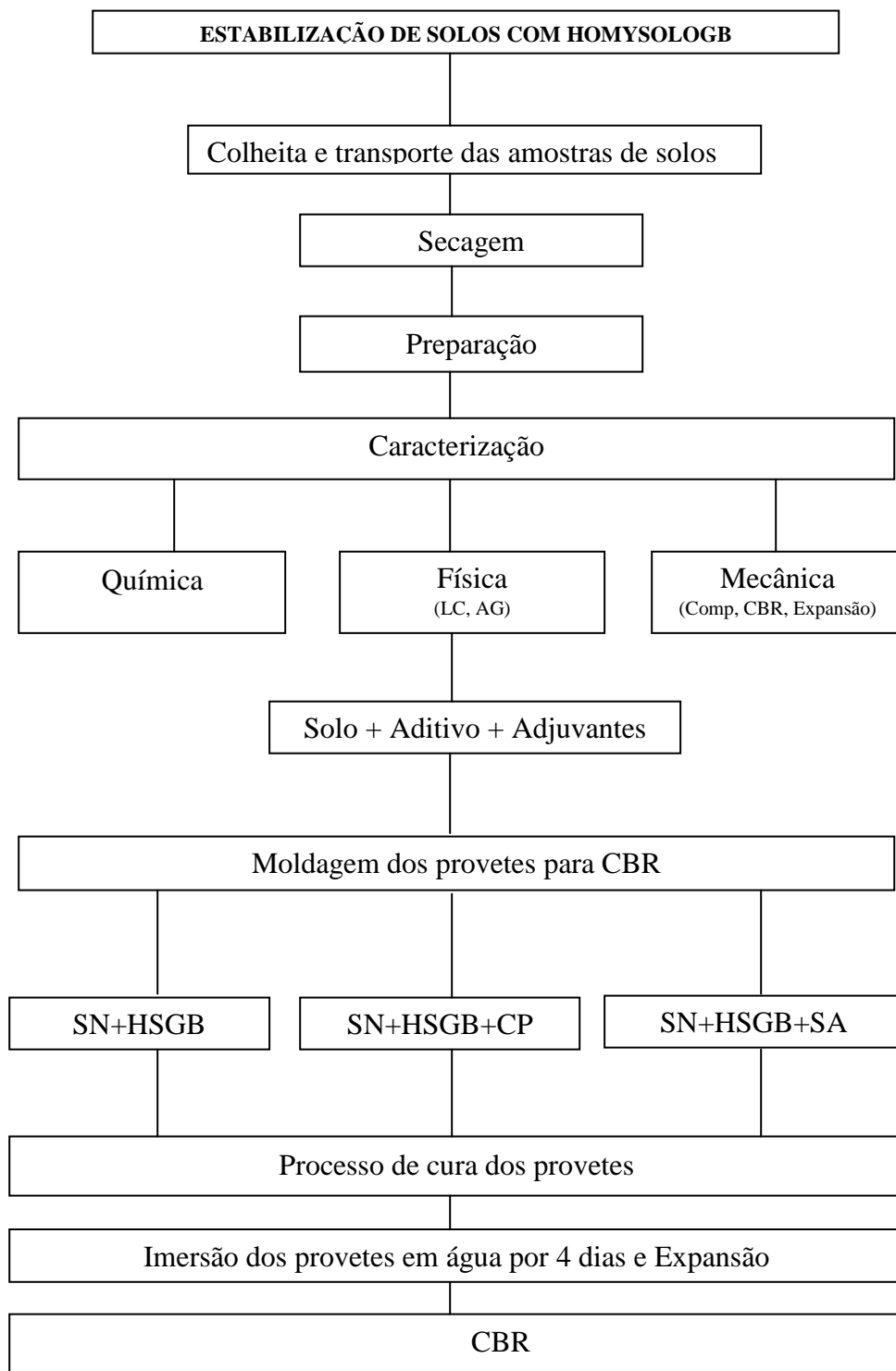
O provete deverá perder aquela massa de água ao ar livre, ou em estufa até 60°C , apos o que, deverá ser imerso em um tanque com água para determinação da absorção de água e expansão, como preconiza o ensaio de CBR, antes da determinação de resistência à penetração.

Se os provetes tiverem reduzidas as suas dimensões com a secagem, e se apresentarem soltos dentro dos moldes, deverão ser retiradas deles, ter desbastadas as bordas de suas superfícies superior e inferior, e apos limpar os moldes, recolocado neles observando a posição original, preencher o espaço entre o provete e o molde com parafina derretidas, respoendo o excesso sobre a superfície o topo ou base.

3.2. MÉTODOS

Nesta pesquisa, empregou-se aditivo químico HomySoloGb e seus adjuvantes aglomerante Cimento Portland e ou reagente/estabilizador Sulfato de Alumínio.

As etapas e procedimentos adoptados neste estudo estão apresentados esquematicamente na figura abaixo a seguir:



Fluxograma dos procedimentos adotados

Fonte: O autor

CAPÍTULO IV – ESTUDO DE CASO: ENSAIOS E ANÁLISE DE RESULTADOS DE ESTABILIZAÇÃO COM ADITIVO E AGLOMERANTE CIMENTO PORTLAND E HOMYSOLOGB E SULFATO DE ALUMÍNIO

4.1. APRESENTAÇÃO

A etapa experimental da presente pesquisa foi realizada no LEM (Laboratório de Engenharia de Moçambique), localizado na Avenida de Moçambique Km 1,5, na cidade de Maputo.

Os solos estudados no presente trabalho são:

- Solos com predominância da fracção argila (solos argilosos)
- Solo com predominância da fracção areia (areno argiloso)

Foram ensaiados nas seguintes situações:

- Natural
- Estabilizado quimicamente com aditivo HomysoloGb
 - Com adjuvante aglomerante Cimento Portland
 - Com adjuvante reagente Sulfato de Alumínio

Nestas situações, o experimento teve por objectivo analisar o comportamento das propriedades mecânicas (CBR e expansibilidade) do solo, com o intuito de compará-las com as características mecânicas recomendadas para o emprego do mesmo em obras de estradas.

Para a caracterização física e mecânica do solo na condição natural, foram realizados os seguintes ensaios:

- Granulometria por peneiração;
- Limite de liquidez (LL);
- Limite de plasticidade (LP);
- Compactação na energia Proctor Modificado;
- Índice Californiano (CBR);
- Expansão;

4.2. MATERIAIS

4.2.1. Solo

Os solos a serem usados para este trabalho são solos provenientes de câmaras de empréstimos localizadas ao longo do traçado das estradas nacionais:

- Solo com predominância da fracção argila (tipo A-5, A-6 e A-7-5 e A-7-6)
- Solo com predominância da fracção areia (tipo A-2-4 a A-2-7)

4.2.2. Metodologia de Campo

As amostras estudadas foram colhidas em campo num total de 8 amostras, distintas de acordo com as características visuais que satisfaçam os pré-requisitos para a realização do estudo e em seguida encaminhada para o local onde os ensaios de caracterização foram realizados, neste caso, na sala de ensaio do laboratório de solos de Repartição de Terraplenagens e Pavimentos - Departamento de Vias de Comunicação do Laboratório de Engenharia de Moçambique (LEM).

Com base nos resultados de caracterizações encontradas, foram seleccionadas 2 amostras que satisfaçam os requisitos para cada um dos casos a estudar a citar solos coesivos com predominância de argila e solos com predominância de areia.

Província	Troço da Estrada	Ponto	Coordenadas
Maputo	Boane – Salamanga	Km 33	436400/7091685
		Km 37	439068/7087592
	Aterro de Beluluane	Km 20	432856/7133601
	Aterro da Ilha Josina Machel	Km 07	489516/7225031
Gaza	Mapapa - Chilembene (R454)	Km 25	524061/7268789
	Guijá – Chibuto (N221)	Km 15	523467/7279738
Inhambane	Maxixe - Homoine (R482)	Km 03	735842/7360306
	Nhaguiviga - Mavenga (R918)	Km 1,5	729310/7347500

Tabela 8 – Proveniência dos solos para o estudo

Fonte: O autor



Figura 1 – Câmara de empréstimo de Boane Km 33
Fonte: O autor



Figura 2 – Processo de colheita de amostras na Câmara de empréstimo de Beluluane
Fonte: O autor

4.2.3. Metodologia de Laboratório

Todas as amostras colhidas foram postas em bandejas e deixada em local coberto porém com incidência de sol, para que ocorresse a secagem natural do solo.

Após a devida secagem, o solo mais graúdo foi destorroado sobre uma lona com pilão grande. A parte mais fina resultante deste processo foi destorroada dentro de um almofariz com o auxílio de um pilão, e peneirada no crivo #4,75 mm a fim de se eliminar a porção graúda do solo, chamado de pedregulho. Em seguida os solos destorroados, e pronto para ser usados, foram esquartelados e armazenados em embalagens plásticas devidamente identificadas.

4.2.4. Ensaio de Caracterização

Os ensaios de caracterização física e mecânica foram realizados de acordo com os procedimentos exigidos pelas Normas Portuguesa (NP) adaptadas com base nas normas da AASTHO e ASTM. Estas são parte de normas usadas para realização de ensaios no Laboratório de Engenharia de Moçambique (LEM).

4.2.5. Análise Granulométrica por Peneiração (NP-E239)

A análise granulométrica procedeu-se com a pesagem de uma amostra húmida de material e seu peneiramento feito no peneiro #n°10 (2,00 mm) e #n°200 (0,075 mm).

Da fracção passante no peneiro #n°10 foi retirada uma amostra com mínimo de 500g da fracção e levada à estufa a uma temperatura de 105° C. Já a fracção retida na peneira #n°200 foi lavada na torneira sob um jacto constante de água, a fim de que as partículas menores (finos) fossem separadas das maiores. Em seguida o material retido nesta peneira foi levado à estufa para a secagem.

A crivagem da porção de material maior que #n°10, ou seja, crivagem grosso consistiu em fazer passar o material numa série de peneiros de malha superior. Feito isso, anotou-se o peso retido acumulado em cada uma delas para a determinação da passagem do material que passa em cada um dos peneiros e traçou-se desta forma a curva granulométrica correspondente a cada solo.

4.2.6. Limite de Liquidez (NP143)

Para a determinação do ensaio de limite de liquidez pesa-se uma determinada quantidade de solo no peneiro #n° 40 (0,420 mm). Esta é colocada num recipiente onde passa-se a adicionar água até que o solo se tornasse uma pasta homogénea.

A mistura é depositada sobre a concha do aparelho Casagrande e ensaiada conforme os procedimentos padrões. Para cada etapa do ensaio, é adicionada água, de acordo com a humidade do solo.

No total foram realizadas quatro etapas para cada ensaio, sendo o número de pancadas o parâmetro para a determinação da humidade. As etapas, na ordem crescente de humidade, são obtidas através dos intervalos de 40-50, 25-30, 20-25 e 10-15 pancadas. Em cada etapa é retirada uma cápsula com um pouco da mistura e levada à estufa para a determinação da humidade.

Um gráfico é traçado após a obtenção dos valores de humidade, onde o valor do limite de liquidez de cada ensaio é determinado pela humidade a correspondente a 25 pancadas.

4.2.7. Limite de Plasticidade (NP143)

Na obtenção do limite de plasticidade, a amostra em estudo deve ser passante no peneiro #n°40 (0,420 mm), assim como no ensaio do limite de liquidez descrito anteriormente e em relação a quantidade também usou-se a mesma para os dois ensaios.

O desenvolvimento do ensaio consistiu em adicionar-se água na amostra até obter-se uma massa homogeneizada.

Em seguida uma pequena quantidade de solo foi modelada de forma cilíndrica, através da rolagem em uma placa de vidro esmerilhada, até a formação de um cilindro com diâmetro aproximado de 3 mm e 10 cm de comprimento.

Repete-se essa etapa até que se inicie o processo de fissuração da amostra, sem que ocorra a desfragmentação. Após isso a amostra foi colocada em uma cápsula, pesada e levada para a secagem na estufa. É feita três verificações até obter-se 3 valores de humidade, que não diferissem da média entre eles mais de 5%.

4.2.8. Compactação Proctor Modificado (E197, LNEC)

Para realização do ensaio foi compactada a amostra de solo em várias camadas em um cilindro metálico com volume conhecido. O ensaio é repetido para diferentes teores em água,

determinando-se para cada um deles a baridade seca. Com os dados obtidos, desenha-se a curva de compactação, que consiste na representação da baridade seca em função do teor em água.

Existe um determinado teor em água para o qual, com uma determinada energia de compactação, se conseguiu melhorar resultados na compactação ou seja maior baridade seca. Assim, esses ensaios permitiram determinar o teor em água para uma dada energia de compactação e determinar o teor para o qual se obtém um peso volumétrico aparente seco máximo.

4.2.9. Ensaio de CBR - Índice Californiano (E198, LNEC)

As amostras foram preparadas em laboratório onde de entre varias energias de compactação (traduzida pelo número de pancadas do pilão Proctor) e diferentes teores em água, de modo a determinar-se para um dado teor em água a evolução do CBR com a compactação relativa, ou para uma dada compactação relativa a respectiva variação com o teor em água. Neste estudo utilizou-se apenas uma energia de compactação do Proctor Modificado e teor em água óptimo.

4.2.10. Emersão em água e expansão

Os provetes devidamente curados, emergiu-se em tanque de água por 96 horas (4 dias) para saturação e medição da expansibilidade. De seguida os provetes receberam pesos (sobrecargas) e mergulhados em um tanque com água, instalou-se o extensómetro para a colecta das medidas em cada 24 horas durante o período de emersão.

4.2.11. Determinação do CBR

Após a última leitura para o cálculo da expansão, os provetes foram retirados do tanque e ficaram durante 15 minutos escoando a água. Em seguida cada um foi colocado na prensa padrão para ensaio de CBR. O ensaio fornece leitura em diferentes pontos de penetração, porém para o cálculo do CBR foram utilizadas apenas duas leituras, 2,54 e 5,08 mm.

4.3. RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA

4.3.1. Identificação das amostras de solos

São apresentados na tabela abaixo 4 amostras de solos seleccionadas para o estudo de acordo com a predominância em sua composição granulométrica da argila ou da areia.

Nº da amostra	Refª LEM	Local da colheita	Província
1	262-B	Boane – Salamanga Km 33	Maputo
2	263-B	Ilha Josina Machel Km 07	
3	264-B	Aterro de Beluluane Km 20	
4	265-B	Boane – Salamanga Km 37	

Tabela 9 – Identificação das amostras de solos em estudo

Fonte: O autor

4.3.2. Caracterização física do solo natural

A caracterização física dos solos em estudo engloba os ensaios de LL e LP, cálculos do IP, IG, classificação segundo a AASTHO.

Nº da amostra	% Limite de Consistência			% Passado no Peneiro			IG	Classificação AASTHO
	LL	LP	IP	#nº10	#nº40	#nº200		
1	26,7	16,9	9,8	99,42	89,74	48,82	4	A-4
2	49,9	31,4	18,5	100,00	100,00	100,00	14	A-7-5
3	16,3	NP	NP	100,00	89,92	12,06	0	A-2-4
4	28,0	14,2	13,8	71,75	52,36	26,90	1	A-2-6

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de Limites de Consistência e Granulometria

Fonte: O autor

Assim, pode-se verificar que os solos estudados neste trabalho:

- **Amostra 1** – é um solo com predominância de silte do grupo A-5, o material deste grupo é um solo siltoso moderadamente plástico. O seu comportamento na camada sob o pavimento é regular a muito mau, daí que foi seleccionado para o estudo de estabilização química com recurso ao aditivo HomysoloGb coadjuvado com aglomerante Cimento Portland.
- **Amostra 2** – é um solo com predominância de argila do subgrupo A-7-5, o material deste grupo é um solo argiloso plástico. O seu comportamento na camada sob o pavimento é muito mau, daí que foi seleccionado para o estudo de estabilização química com recurso ao aditivo HomysoloGb coadjuvado com aglomerante Cimento Portland.

- **Amostra 3** – é um solo com predominância da areia siltosa de subgrupo A-2-4, que é constituído por materiais como seixos e areia com quantidades de silte. O seu comportamento na camada sob o pavimento é bom. Dai que para um comportamento excelente foi seleccionado para a estabilização química com recurso ao aditivo HomysoloGb coadjuvado com reagente/catalisador Sulfato de Alumínio.
- **Amostra 4** - é um solo com predominância dos seixos e areias siltosos de subgrupo A-2-6, que é constituído por materiais como seixos e areia com quantidades de silte. O seu comportamento na camada sob o pavimento é regular a muito mau, dai que foi seleccionado para o estudo de estabilização química com recurso ao aditivo HomysoloGb coadjuvado com reagente/catalisador Sulfato de Alumínio.

4.3.3. Caracterizações mecânicas das amostras do solo natural

Nesta etapa foram realizados ensaios de compactação, CBR e expansibilidade com as duas amostras de solos seleccionados a fim de aferir as características mecânicas no seu estado natural, isto é, sem adição de estabilizantes. Para realização do ensaio de CBR trabalhou-se com a humidade óptima, obtida através do ensaio de compactação do Proctor modificado.

Nº da amostra	Compactação MOD AASHTO		Índice Californiano	
	Baridade (Kg/m ³)	Teor Óptimo de humidade (%)	CBR (%)	Expansão (%)
1	1941	12,4	12,4	6,9
2	1676	15,8	3,4	8,2
3	1962	7,4	31,4	0,0
4	1956	10,8	17,3	0,7

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de Compactação, CBR e Expansão

Fonte: O autor

4.3.4. Processo de preparo das soluções em laboratório

4.3.4.1. Solução de HomysoloGb a 5% em peso

Preparou-se uma balança e uma proveta de acordo com o recomendado no procedimento, de seguida, pesou-se a quantidade de 50g de HomysoloGb e adicionou-se água destilada, agitou-se levemente para a completa homogeneização, até a marca de 1.000ml.

4.3.4.2. Solução de Sulfato de Alumínio a 1% em peso

Preparou-se uma balança e uma proveta de acordo com o recomendado no procedimento, de seguida, pesou-se a quantidade de 10g de Sulfato de Alumínio e adicionou-se água destilada, agitou-se levemente para a completa homogeneização, até a marca de 1.000ml.



Figura 3 – Preparação da solução HomysoloGB (HSGB)

Fonte: O autor



Figura 4 – Preparação da solução Sulfato de Alumínio (SA)

Fonte: O autor

4.4. ENSAIOS DE ESTABILIZAÇÃO COM ADITIVO HOMYSOLOGB E AGLOMERANTE CIMENTO PORTLAND

4.4.1. Ensaio de CBR em Amostras-1 e Amostra-2

As amostras 1 e 2 foram seleccionadas para o estudo de estabilização química com recurso ao aditivo HomysoloGb com adição do aglomerante Cimento Portland.

Designação	Amostra-1	Amostra-2
Massa da amostra preparada	6.000g	6.000g
Densidade máxima aparente seca	1941 Kg/m ³	1676 Kg/m ³
Teor óptimo de humidade	12,0%	15,8%
Grau hidrocópico	4,2%	8.4%

Tabela 12 – Dados dos solos das amostras 1 e 2

Fonte: O autor

4.4.2. Processo de preparo das soluções em laboratório

4.4.2.1. Solução de HomysoloGb a 5% em peso

Preparou-se uma balança e uma proveta de acordo com o recomendado no procedimento, de seguida, pesou-se a quantidade de 50g de HomysoloGb e adicionou-se água destilada, agitou-se levemente para a completa homogeneização, até a marca de 1.000ml.

4.4.2.2. Determinação do volume da solução a 5%

- Cálculo do volume da solução do estabilizante

A dosagem é de 1:1.500 em peso em relação ao peso seco da amostra

$$V_{\text{sol}} = 20 \times 6.000\text{g} / 1.500 = 80\text{ml da solução de estabilizante a 5\%}$$

Adicionou-se a esta quantidade da solução a 5% (80ml) à quantidade de água destilada necessária para obtenção da humidade óptimo.

4.4.3. Processo de ensaio de CBR

4.4.3.1. Cálculo da água a acrescentar

- Grau hidrocópico:

Amostra-1: 4,2%

Amostra-2: 4,7%

- Peso do solo seco:

$$\text{Amostra-1: } 6.000\text{g} - 6.000 \times 4,2\% = 6.000 - 252 = 5.748\text{g}$$

$$\text{Amostra-2: } 6.000\text{g} - 6.000 \times 8,4\% = 6.000 - 504 = 5.496\text{g}$$

- Diferença entre a humidade hidrocópica e óptima:

$$\text{Amostra-1: } 12,0\% - 4,2\% = 7,8\%$$

$$\text{Amostra-2: } 15,8\% - 8,4\% = 7,4\%$$

- Quantidade de água a adicionar à solução para atingir a humidade óptima:

$$\text{Amostra-1: } 5.748 \times 0,078 = 448\text{ml ou aproximadamente } 450\text{ml}$$

$$\text{Amostra-2: } 5.496 \times 0,074 = 407\text{ml ou aproximadamente } 410\text{ml}$$

4.4.3.2. Moldagem dos provetes

4.4.3.2.1. Moldagem dos provetes com aditivo HomysoloGb

Assim, colocou-se a solução de trabalho HomysoloGb a 5% (80ml) no provete e adicionou-se água destilada até atingir a quantidade da humidade óptima. De seguida, espargiu-se sobre a amostra estabelecendo a homogeneidade para moldagem dos provetes.

Após a moldagem, os provetes foram deixados ao sol para secagem até perder 40% do conteúdo hídrico.

Um dado não menos importante, segundo manual de procedimentos, os provetes estarão impermeabilizados somente após a perda de 40% do conteúdo hídrico, o que reproduz as condições observadas em campo.

Os provetes devidamente curados, emergiu-se em tanque de água por 96 horas (4 dias) para saturação e medição da expansibilidade. Após 4 dias os provetes foram submetidos a penetração para determinação do valor do CBR.

4.4.3.2.2. Moldagem dos provetes com aditivo HomysoloGb + Cimento

Para observação de resistência mais elevadas as amostras 1 e 2, para além do estabilizante HomysoloGb, foi necessário adicionar o Cimento Portland na dosagem de 1%, 2% e 3% em peso, onde as quantidades de cimento foram calculadas da seguinte forma:

- Quantidade de cimento (1%) a adicionar a amostra = $6.000\text{g} \times 1\% = 60\text{g}$
- Quantidade de cimento (2%) a adicionar a amostra = $6.000\text{g} \times 2\% = 120\text{g}$
- Quantidade de cimento (3%) a adicionar a amostra = $6.000\text{g} \times 3\% = 180\text{g}$

4.4.3.2.3. Moldagem dos provetes com aglomerante Cimento

Para observação de resultados comparativos foram moldados provetes apenas com adição de Cimento Portland as amostras 1 e 2, na mesma proporção.

4.4.4. Apresentação de resultados

Abaixo são apresentados os resultados de CBR e Expansão da Amostra-1 e Amostra-2.

Etapas	Amostra-1		Amostra-2	
	CBR (%)	Expansão (%)	CBR (%)	Expansão (%)
SN	12,4	6,9	3,4	8,2
SN+CP1%	22,9	0,7	11,4	7,0
SN+CP2%	84,6	0,4	16,0	3,7
SN+CP3%	151,8	0,2	21,3	3,3
SN+HSGB	12,9	0,0	4,1	1,3
SN+HSGB+CP1%	25,8	0,0	14,9	0,9
SN+HSGB+CP2%	87,4	0,0	29,7	0,6
SN+HSGB+CP3%	159,3	0,0	39,5	0,2

Tabela 13 – Resultados de CBR e Expansão da Amostra-1 e Amostra-2

Fonte: O autor

4.5. ENSAIOS DE ESTABILIZAÇÃO COM ADITIVO HOMYSOLOGB E SULFATO DE ALUMÍNIO

4.5.1. Ensaio de CBR em Amostras-3 e Amostra-4

As amostras 3 e 4 foram seleccionadas para o estudo de estabilização química com recurso ao aditivo HomysoloGb com adição do reagente/catalisador Sulfato de Alumínio.

Designação	Amostra-3	Amostra-4
Massa da amostra preparada	6.000g	6.000g
Densidade máxima aparente seca	1962Kg/m ³	1956Kg/m ³
Teor óptimo de humidade	7,4%	10,8%
Grau hidrocópico	0,99%	3,08%

Tabela 14 – Dados das amostras 3 e 4

Fonte: O autor

4.5.2. Processo de preparo das soluções em laboratório

4.5.2.1. Solução de HomysoloGb a 5% em peso

Preparou-se uma balança e uma proveta de acordo com o recomendado no procedimento, de seguida, pesou-se a quantidade de 50g de HomysoloGb e adicionou-se água destilada, agitou-se levemente para a completa homogeneização, até a marca de 1.000ml.

4.5.2.2. Solução de Sulfato de Alumínio a 1% em peso

Preparou-se uma balança e uma proveta de acordo com o recomendado no procedimento, de seguida, pesou-se a quantidade de 10g de Sulfato de Alumínio e adicionou-se água destilada, agitou-se levemente para a completa homogeneização, até a marca de 1.000ml.

4.5.2.3. Determinação do volume da solução de estabilizante HomysoloGb

- Cálculo do volume da Solução de estabilizante HomysoloGb
A dosagem é de 1:1.000 em peso em relação ao peso seco da amostra
 $V_{\text{Sol}} = 6.000\text{g} / 50 = 120\text{ml}$ da solução de estabilizante a 5%.
- Cálculo do volume da solução de Sulfato de Alumínio
 $V_{\text{Sol SA}} = 6.000\text{g} / 50 = 120\text{ ml}$ da solução do reagente/catalisador a 1%.

4.5.3. Processo de ensaio de CBR

4.5.3.1. Cálculo da água a acrescentar

- Grau hidrocópico:
Amostra-3: 0,99%
Amostra-4: 3,08%
- Peso do solo seco:
Amostra-3: $6.000\text{g} - 6.000 \times 0,99\% = 6.000 - 59,4 = 5.941\text{g}$
Amostra-4: $6.000\text{g} - 6.000 \times 3,08\% = 6.000 - 184,8 = 5.815\text{g}$
- Diferença entre a humidade hidrocópica e óptima:
Amostra-3: $7,4\% - 0,99\% = 6,4\%$
Amostra-4: $10,8\% - 3,08\% = 7,7\%$
- Quantidade de água a adicionar à solução para atingir a humidade óptima:

Amostra-3: $5.941\text{g} \times 0,064 = 381\text{ml}$ ou aproximadamente 380ml

Amostra-4: $5.815\text{g} \times 0,077 = 448\text{ml}$ ou aproximadamente 450ml

4.5.3.2. Moldagem dos provetes

4.5.3.2.1. Moldagem dos provetes com estabilizante HomysoloGb

Assim, colocou-se a solução de trabalho HomysoloGb a 5% (120ml) no provete e adicionou-se água destilada até atingir a quantidade da humidade óptima. De seguida, espargiu-se sobre a amostra estabelecendo a homogeneidade para moldagem dos provetes.

Após a moldagem, os provetes foram deixados ao sol para secagem, e como no dia do ensaio o sol não brilhou, submeteu-se em estufa a até 60°C para acelerar a secagem até perder 40% do conteúdo hídrico.

Os provetes devidamente curados, emergiu-se em tanque de água por 96 horas (4 dias) para saturação e medição da expansibilidade. Após 4 dias os provetes foram submetidos a penetração para determinação do valor do CBR.

4.5.3.2.2. Moldagem dos provetes com aditivo HomysoloGb e Sulfato de Alumínio

Adiciona-se à amostra o conteúdo da proveta com a solução de HomySolo GB mais a quantidade de água pura necessária para completar 50% da quantidade total de água, homogeneiza-se bem, depois adiciona-se o conteúdo da proveta da solução de Sulfato de Alumínio mais a quantidade de água, homogeneiza-se bem, e de seguida procedeu à moldagem dos provetes de CBR.

4.5.4. Apresentação de resultados

Abaixo são apresentados os resultados de CBR e Expansão da Amostra-3 e Amostra-4.

Etapas	Amostra-3		Amostra-4	
	CBR (%)	Expansão (%)	CBR (%)	Expansão (%)
SN	28,8	0,0	23,7	0,7
SN+HSGB	30,4	0,0	25,8	0,0
SN+HSGB+SA	84,3	0,0	37,7	0,0

Tabela 15 – Resultados de CBR e Expansão da Amostra-3 e Amostra-4

Fonte: O autor



Figura 5 – Compactação e moldagem dos provetes
Fonte: O autor



Figura 6 – Processo de secagem dos provetes de CBR ao ar livre
Fonte: O autor



Figura 7 – Processo de ensaio de CBR
Fonte: O autor

4.6. ANÁLISE DE RESULTADOS

Para a análise comparativa dos resultados do CBR e Expansão baseou-se nas seguintes fórmulas:

- Cálculo percentual do aumento de CBR:

$$\% X_{\text{(Aumento)}} = V_f \times 100\% / V_i - 100\%$$

Equação 6 – % do aumento de CBR

Fonte: O autor

- Cálculo percentual da redução da Expansão:

$$\% X_{\text{(Redução)}} = V_i \times 100\% / V_f - 100\%$$

Equação 7 – % da redução da Expansão

Fonte: O autor

Onde:

V_i – Valor inicial obtido (CBR ou Expansão)

V_f – Valor final obtido (CBR ou Expansão)

4.6.1. Análise de resultados de solos com predominância da argila, estabilizadas com aditivo HomysoloGb e Cimento

As amostras 1 e 2 são solos com predominância de argila, no qual foram estabilizadas com aditivo HomysoloGb e adição do aglomerante Cimento Portland.

4.6.1.1. Análise de resultados da Amostra-1

a) Comparação de resultados de desempenho entre o solo natural e solos estabilizados com distintos aditivos

Os resultados constam da tabela 15 e gráfico 1 e 2. Da análise, constata-se que:

- O SN+HSGB obteve quase o mesmo CBR que SN, isto é, o aditivo HomysoloGb não teve influência na resistência, mas anula significativamente a sua expansão.
- O SN+CP obteve CBR maiores que SN, isto é, o aglomerante Cimento Portland proporciona resistência significativa e anula a expansão.
- O SN+HSGB+CP tem quase mesmo CBR que o SN+CP, isto é, o aditivo HomysoloGb não teve influência significativa na resistência e na expansão, pois que o Cimento Portland por si só proporciona tais efeitos.

Etapas	Amostra-1	
	CBR (%)	Expansão (%)
SN	12,4	6,9
SN+HSGB	12,9	0,0
SN+CP1%	22,9	0,7
SN+HSGB+CP1%	25,8	0,0
SN+CP2%	84,6	0,4
SN+HSGB+CP2%	87,4	0,0
SN+CP3%	151,8	0,2
SN+HSGB+CP1%	159,3	0,0

Tabela 16 – Resultados comparativos da Amostra-1

Fonte: O autor

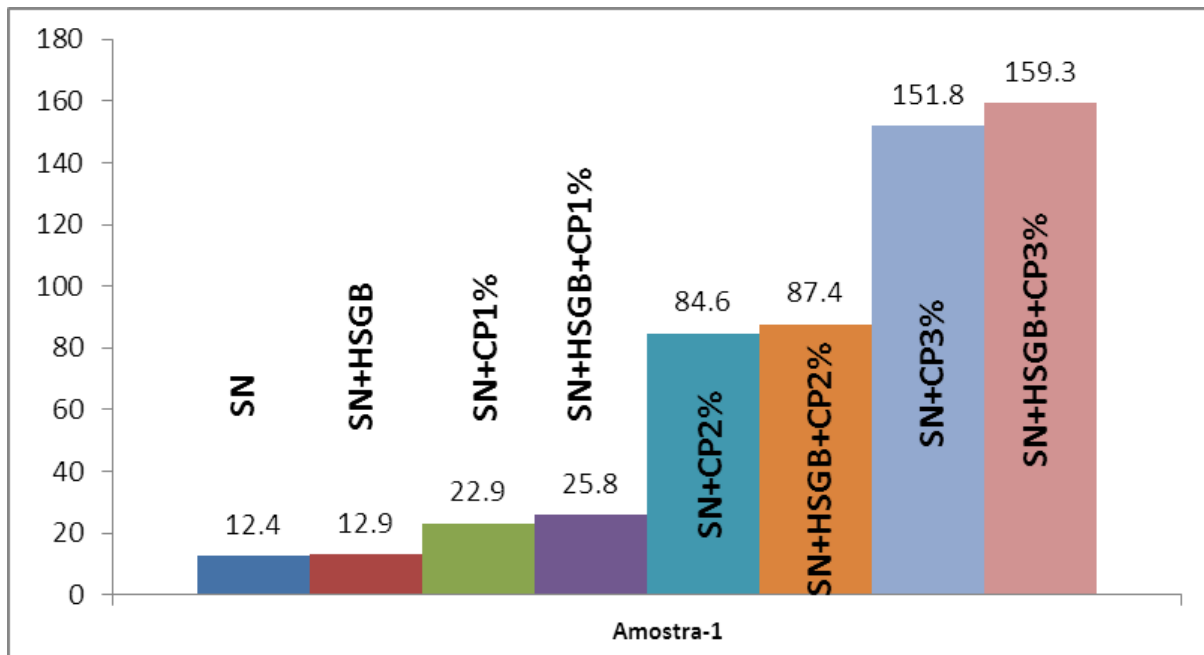


Gráfico 1 – Análise comparativa entre os CBR da Amostra-1

Fonte: O autor

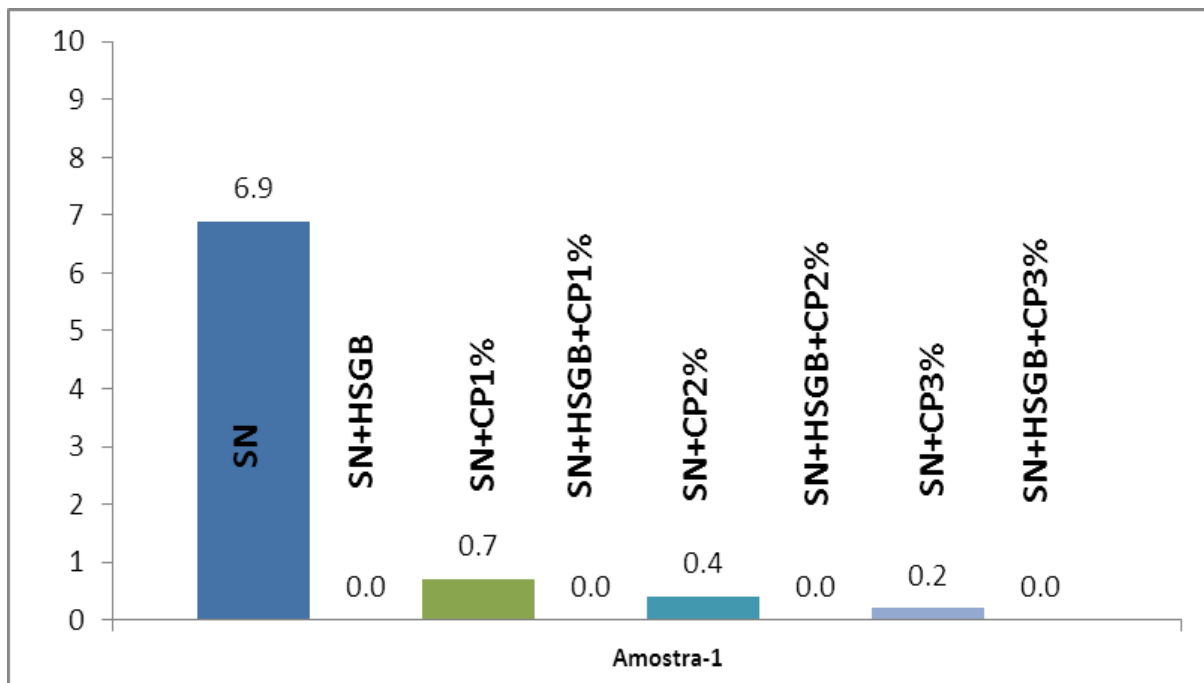


Gráfico 2 – Análise comparativa entre as Expansões da amostra-1

Fonte: O autor

b) Comparação da tendência de CBR entre o solo natural e solos estabilizados com distintos aditivos

De acordo com ROESSLER (2016), no seu manual de laboratório - impermeabilização química de solos coesivos por troca de catiões, preconiza que, para obtenção de bons resultados, o solo deve ter pelo menos 15% de argila e este tem menos do que 15%.

Anteriormente a Amostra-1 foi classificada como solo siltoso do grupo A-5 [4], cujos gráficos 3 e 4 abaixo demonstram o seguinte:

- Na comparação entre os resultados de SN (CBR=12,4 e Exp=6,9) e SN+HSGB (CBR=12,9 e Exp=0,0) não houve ganho de resistência esperado do solo coesivo ao perder humidade, porque tem maior quantidade de silte do que argila.

Nota-se que o estabilizante HomysoloGb agiu sobre argila e anulou o efeito expansivo em 100%, mas a potencial resistência devido à coesão é bastante insignificante, justamente pela predominância de silte.

- Na comparação entre os resultados SN (CBR=12,4 e Exp=6,9) e SN+CP (CBR=84,6 e Exp=0,4) verifica-se que houve ganho da resistência de cerca de 556% quase que a mesma SN+HSGB+CP (CBR=87,4 e Exp=0,0), mas também pode-se observar que o efeito expansivo da mesma foi anulado nas duas variáveis em 100%.

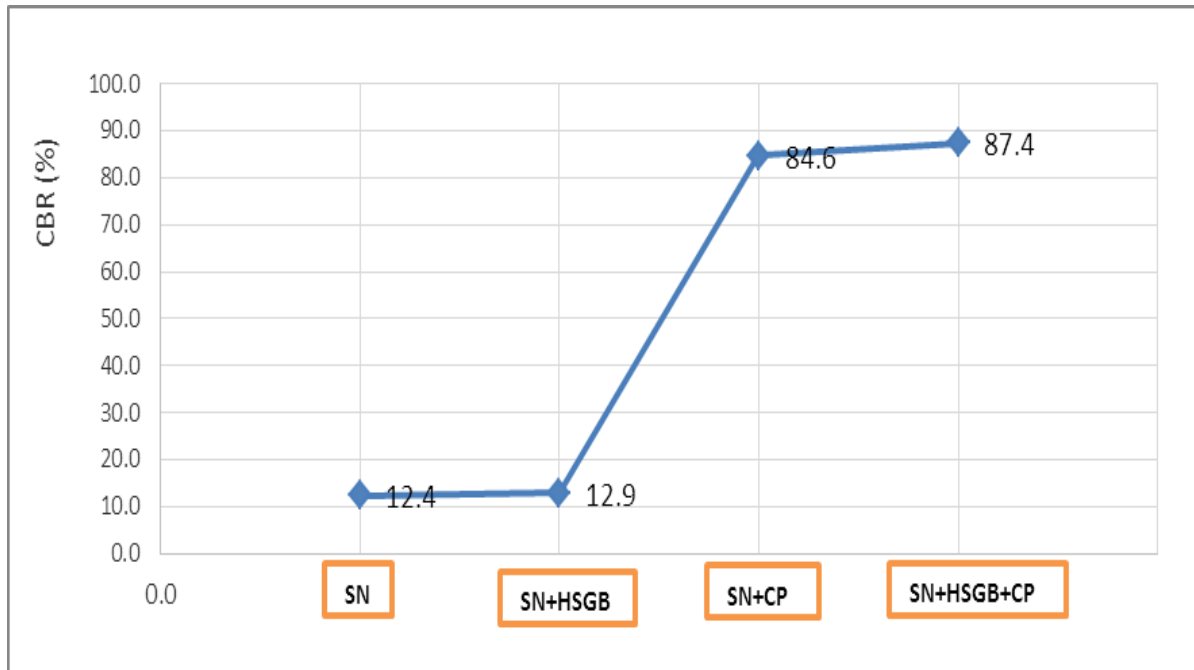


Gráfico 3 – Análise com linha de tendência do CBR da Amostra-1
Fonte: O autor

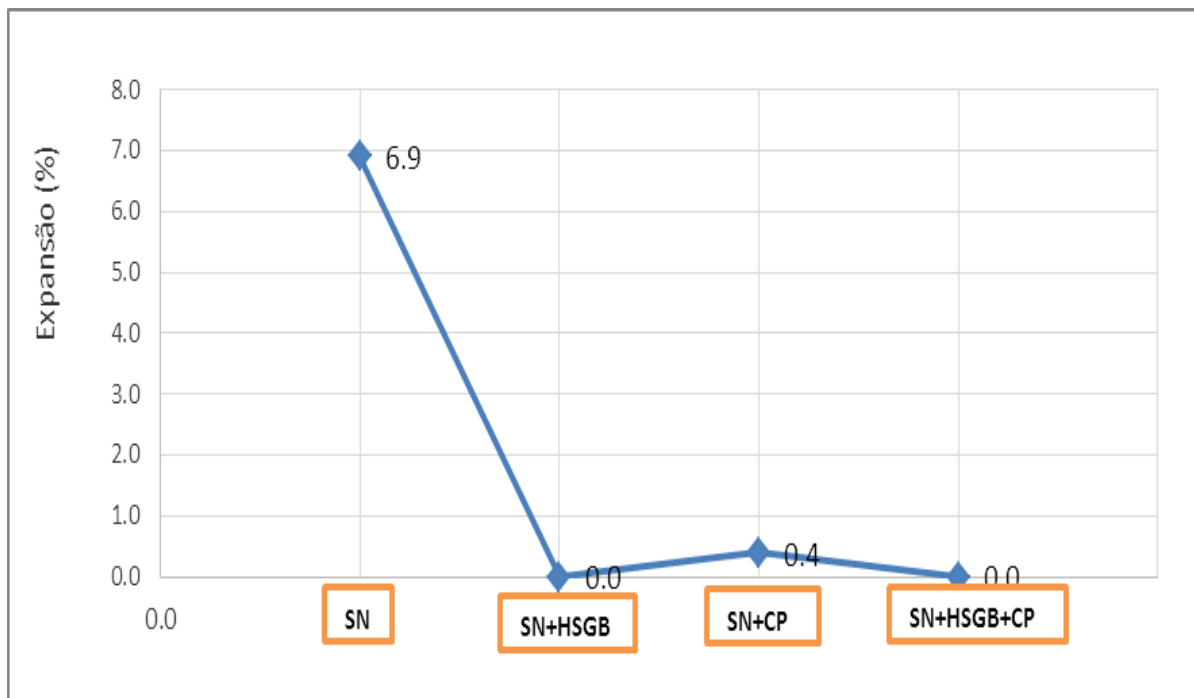


Gráfico 4 – Análise com linha de tendência do CBR da Amostra-1
Fonte: O autor

4.6.1.2. Análise de resultados da Amostra-2

a) Comparação de resultados de desempenho entre o solo natural e solos estabilizados com distintos aditivos

Os resultados constam da tabela 16 e gráfico 5 e 6. Da análise, constata-se que:

- O SN+HSGB obteve quase o mesmo CBR que SN, isto é, o aditivo HomysoloGB não teve influência na resistência, mas anulou significativamente a sua expansão.
- O SN+CP obteve CBR maiores que SN, isto é, o aglomerante Cimento Portland proporcionou resistência significativa e anulou a expansão.
- O SN+HSGB+CP tem quase mesmo CBR que o SN+CP, isto é, o aditivo HomysoloGb com a adição Cimento Portland obteve resistência significativa e na anulação da expansão.

Etapas	Amostra-2	
	CBR (%)	Expansão (%)
SN	3,4	8,2
SN+HSGB	4,1	2,9
SN+CP1%	11,4	7,0
SN+HSGB+CP1%	14,9	1,3
SN+CP2%	16,0	3,7
SN+HSGB+CP2%	29,7	0,9
SN+CP3%	21,3	3,3
SN+HSGB+CP3%	39,5	0,2

Tabela 17 – Resultados comparativos da Amostra-2

Fonte: O autor

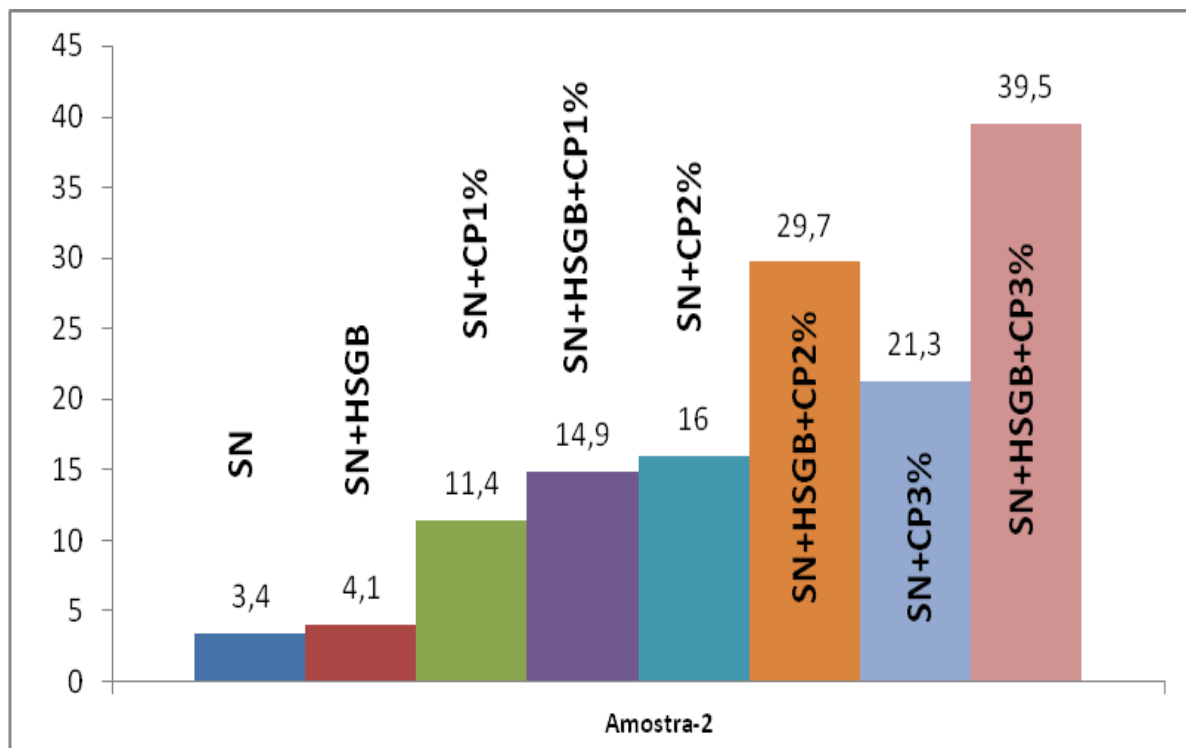


Gráfico 5 – Análise comparativa entre os CBR da Amostra-2

Fonte: O autor

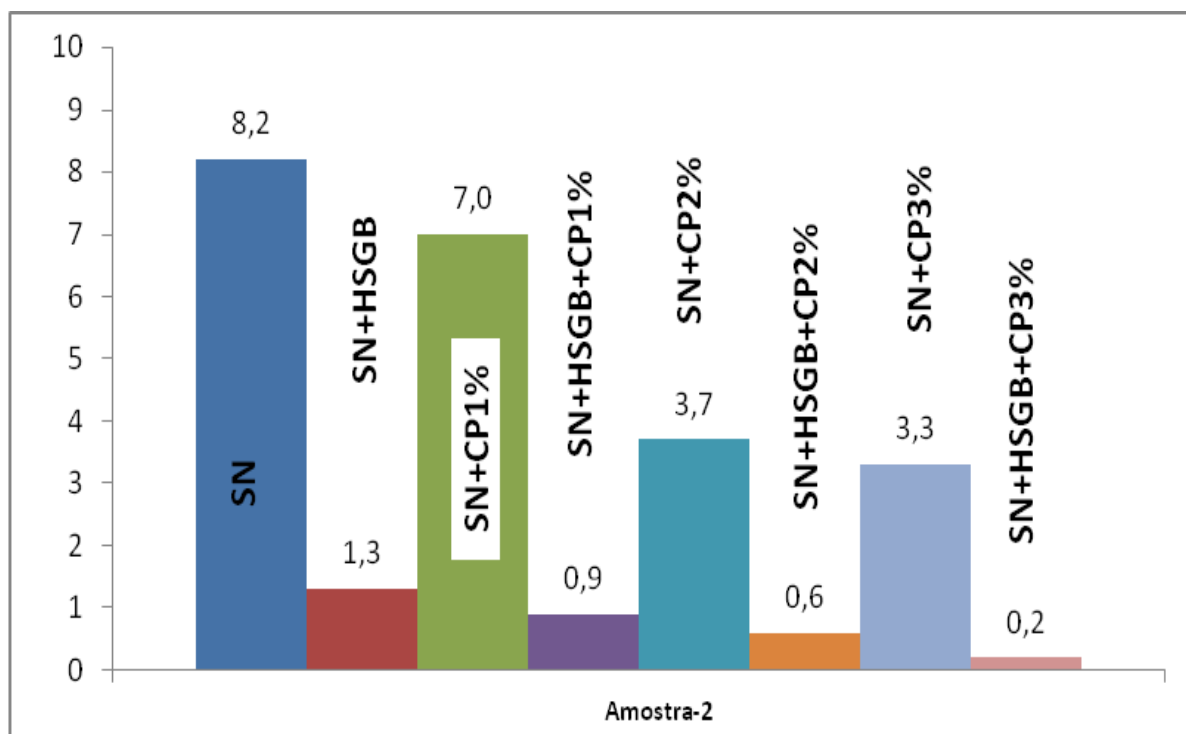


Gráfico 6 – Análise comparativa entre as Expansões da Amostra-2

Fonte: O autor

b) Comparação da tendência de CBR entre o solo natural e solos estabilizados com distintos aditivos

Anteriormente a Amostra-2 foi classificada como solo argiloso do Subgrupo A-7-5 [14], os gráficos 7 e 8 abaixo demonstram que:

- Na comparação entre os resultados de SN (CBR=3,4 e Exp=8,2) e SN+HSGB (CBR=4,1 e Exp=1,3) verifica-se que não houve ganho considerável de resistência, mas a expansão anulou significativamente em 85%.
- Na comparação entre os resultados SN (CBR=3,4 e Exp=8,2) e SN+CP (CBR=21,3 e Exp=3,3) verifica-se que houve ganho de resistência em cerca de 526% e redução do efeito expansivo em 60%.
- Na comparação entre os resultados de SN+CP (CBR=21,3 e Exp=3,3) e SN+HSGB+CP (CBR=39,5 e Exp=0,2) verifica-se que houve ganho adicional de resistência em cerca de 86% e anulação do efeito expansivo em 100%.

Este solo tem maior quantidade de argila, e o estabilizante HomysoloGb agiu muito bem sobre argila ao proporcionar condições favoráveis para aumento da resistência.

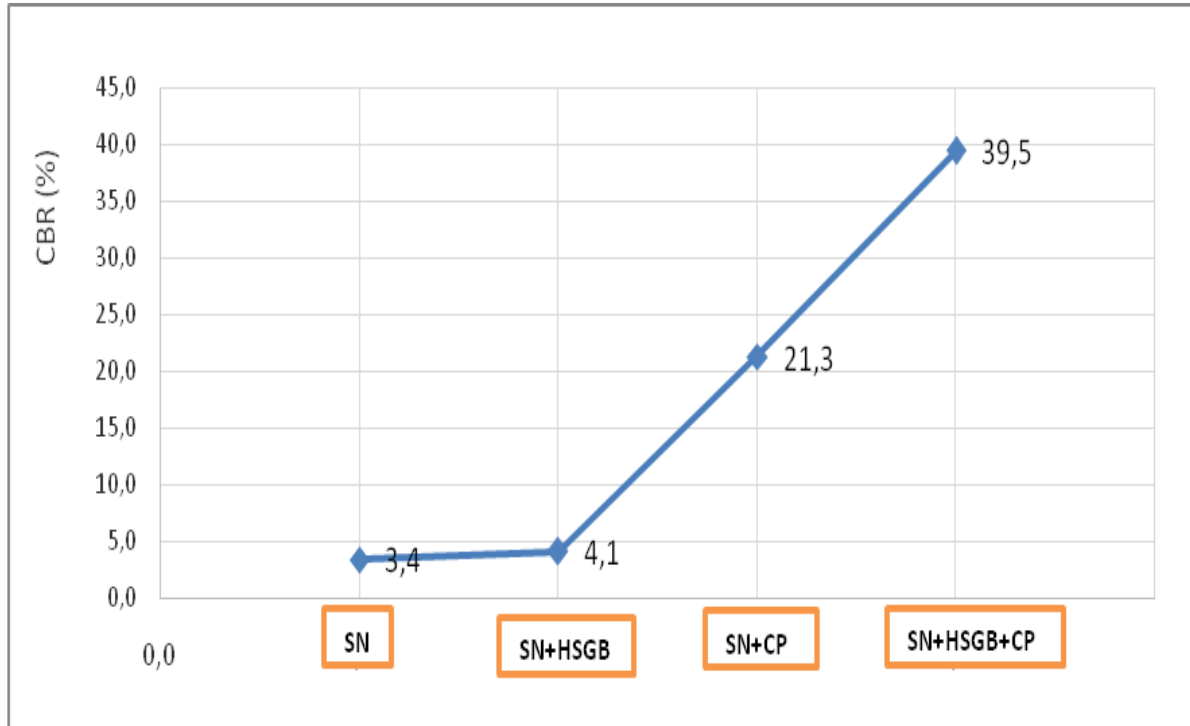


Gráfico 7 – Análise com linha de tendência do CBR da Amostra-2
Fonte: O autor

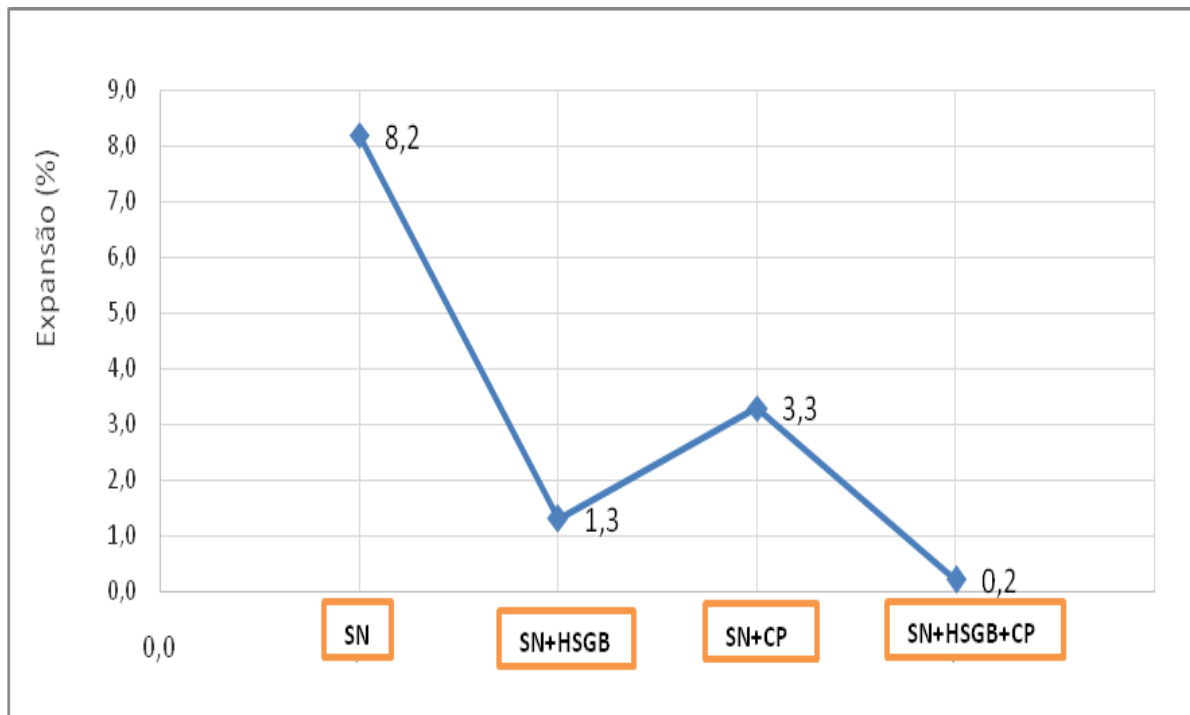


Gráfico 8 – Análise com linha de tendência das Expansões da Amostra-2
Fonte: O autor

4.6.2. Análise de resultados de solos com predominância da areia (estabilizadas com aditivo HomysoloGb e Sulfato de Alumínio)

As amostras 3 e 4 são solos com predominância de areia, no qual foram estabilizadas com aditivo HomysoloGb e reagente/catalisador Sulfato de Alumínio.

4.6.2.1. Análise de resultados da Amostra-3

a) Comparação de resultados de desempenho entre o solo natural e solos estabilizados com distintos aditivos

Os resultados constam da tabela 17 e gráfico 9 e 10. Da análise, constata-se que:

- O SN+HSGb obteve quase que o mesmo CBR que SN, isto é, o aditivo HomysoloGb não teve influência na resistência e a sua expansão permanece nulo.
- O SN+HSGB+SA obteve ganho de CBR na ordem dos 37% que SN+HSGB isto é, o HomysoloGb e reagente/catalisador Sulfato de Alumínio proporciona resistência significativa no solo e a expansão permanece nulo.

Etapas	Amostra-1	
	CBR (%)	Expansão (%)
SN	30,4	0,0
SN+HSGB	31,9	0,0
SN+HSGB+SA	69,3	0,0

Tabela 18 – Resultados comparativos da Amostra-3

Fonte: O autor

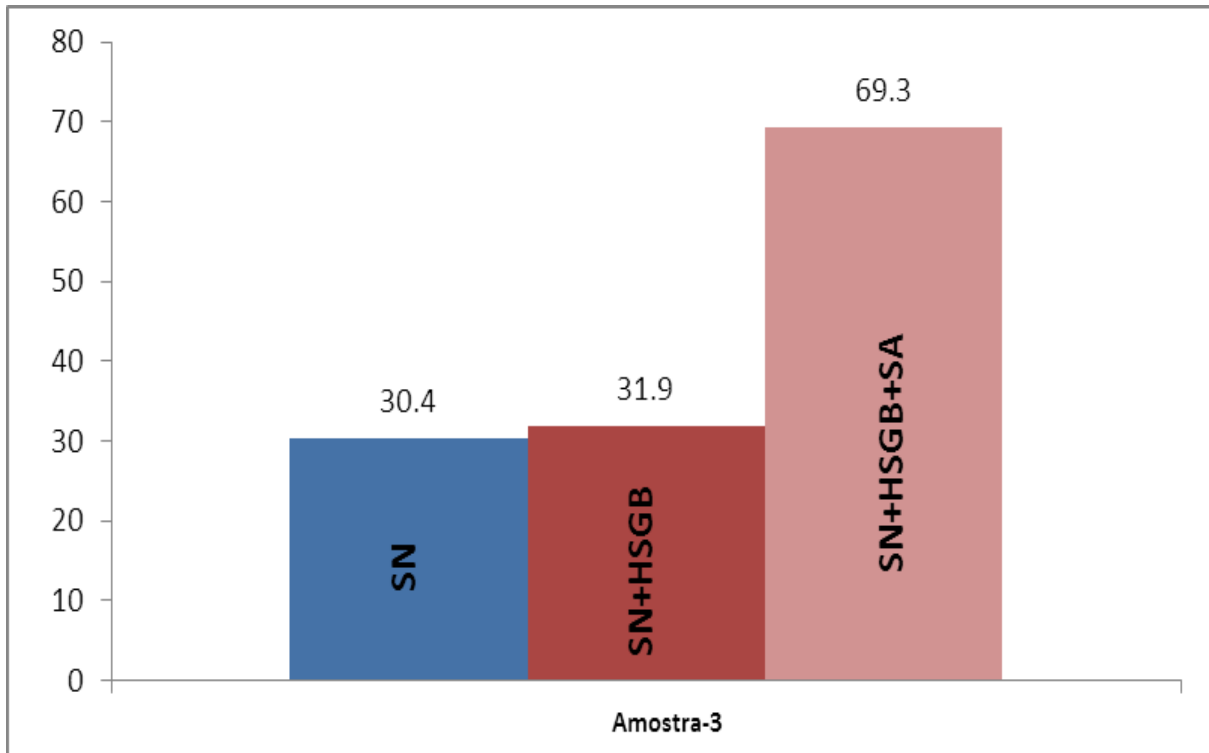


Gráfico 9 – Análise comparativa entre os CBR da Amostra-3

Fonte: O autor

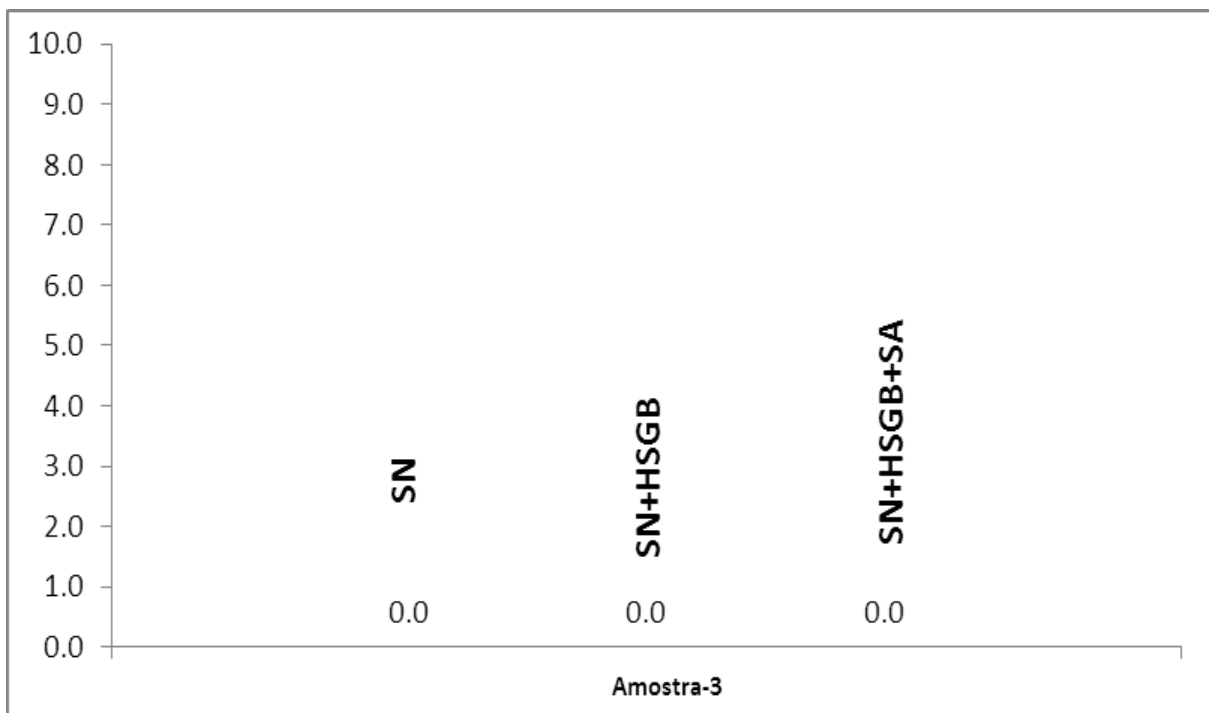


Gráfico 10 – Análise comparativa entre as Expansões da Amostra-3

Fonte: O autor

b) Comparação da tendência de CBR entre o solo natural e solos estabilizados com distintos aditivos

A Amostra-3 foi classificada como solo siltoso misturado com areia do Grupo A-2-4 [4], os gráficos 11 e 12 abaixo demonstram que:

- Na comparação entre os resultados do SN (CBR=30,4 e Exp=0,0) e SN+HSGB (CBR=31,9 e Exp=0,0) verifica-se que não houve ganho considerável de resistência como era de se esperar, devido a escassez da fracção argila que são promotoras da coesão tornando este solo muito fiável, rompendo sua estrutura sob esforços repetitivos.
- Na comparação entre os resultados do SN (CBR=30,4 e Exp=0,0) e SN+HSGB+SA (CBR=39,3 e Exp=0,0), verifica-se que houve ganho de resistência em cerca de 29%. Este ganho deve-se a presença da fracção areia que fornece a parcela da resistência ao cisalhamento através do atrito intergranular e a coesão da pequena fracção da argila.

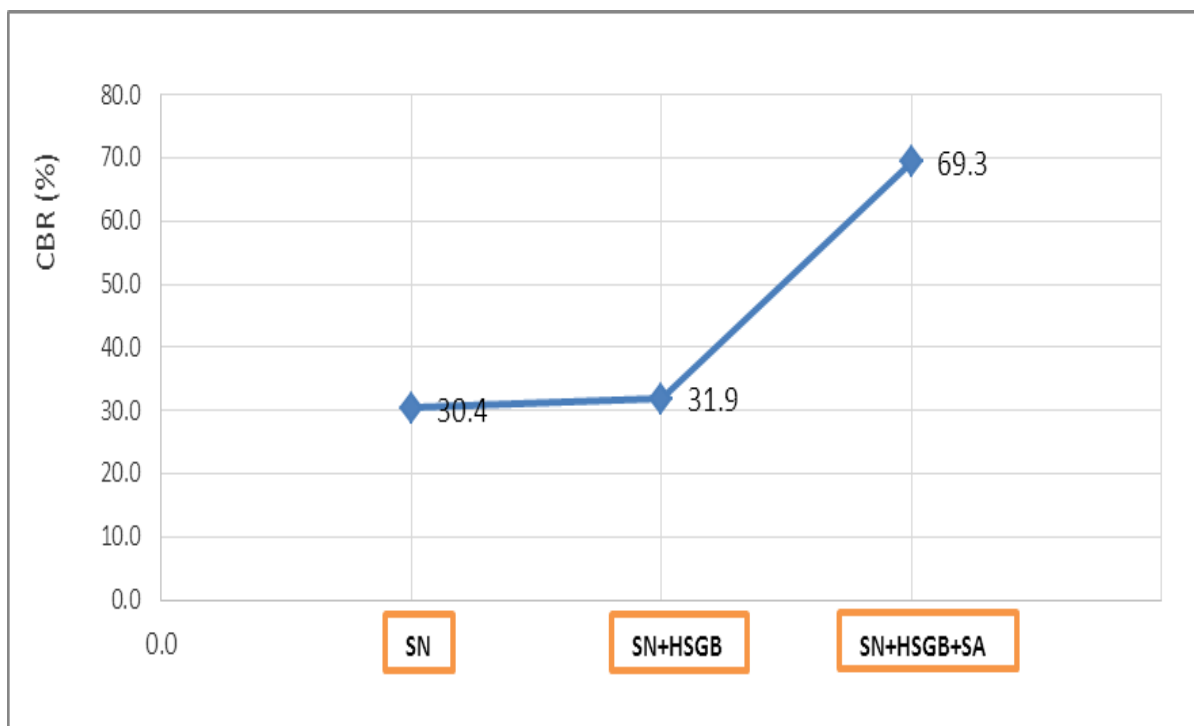


Gráfico 11 – Análise com linha de tendência do CBR da Amostra-3
 Fonte: O autor

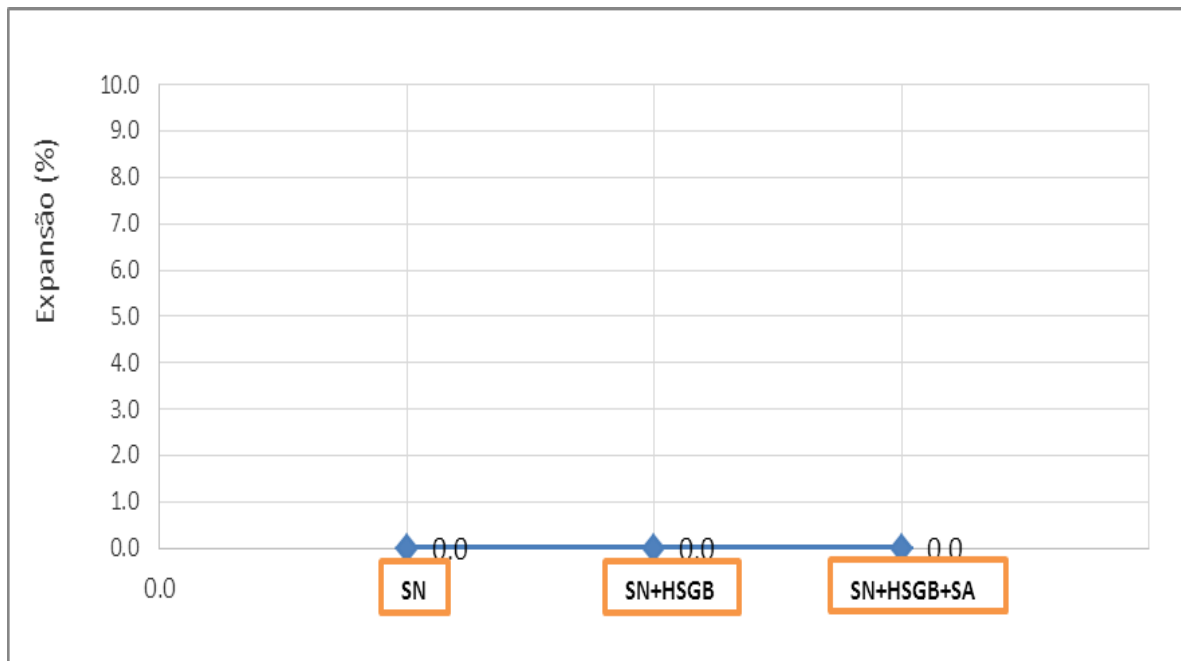


Gráfico 12 – Análise com linha de tendência das Expansões da Amostra-3

Fonte: O autor

4.6.2.2. Análise de resultados da Amostra-4

a) Comparação de resultados de desempenho entre o solo natural e solos estabilizados com distintos aditivos

Os resultados constam da tabela 18 e gráfico 13 e 14. Da análise, constata-se que:

- O SN+HSGB obteve melhor CBR que SN, isto é, o aditivo HomysoloGb teve influência na resistência e a sua expansão permanece nula, eliminando a residual.
- O SN+HSGB+SA obteve CBR maiores que SN+HSGB, isto é, o HomysoloGb e reagente/catalisador Sulfato de Alumínio proporciona resistência e a expansão permanece nula.

Etapas	Amostra-4	
	CBR (%)	Expansão (%)
SN	23,3	0,7
SN+HSGB	25,8	0,0
SN+HSGB+SA	37,7	0,0

Tabela 18 – Resultados comparativos da Amostra-4

Fonte: O autor

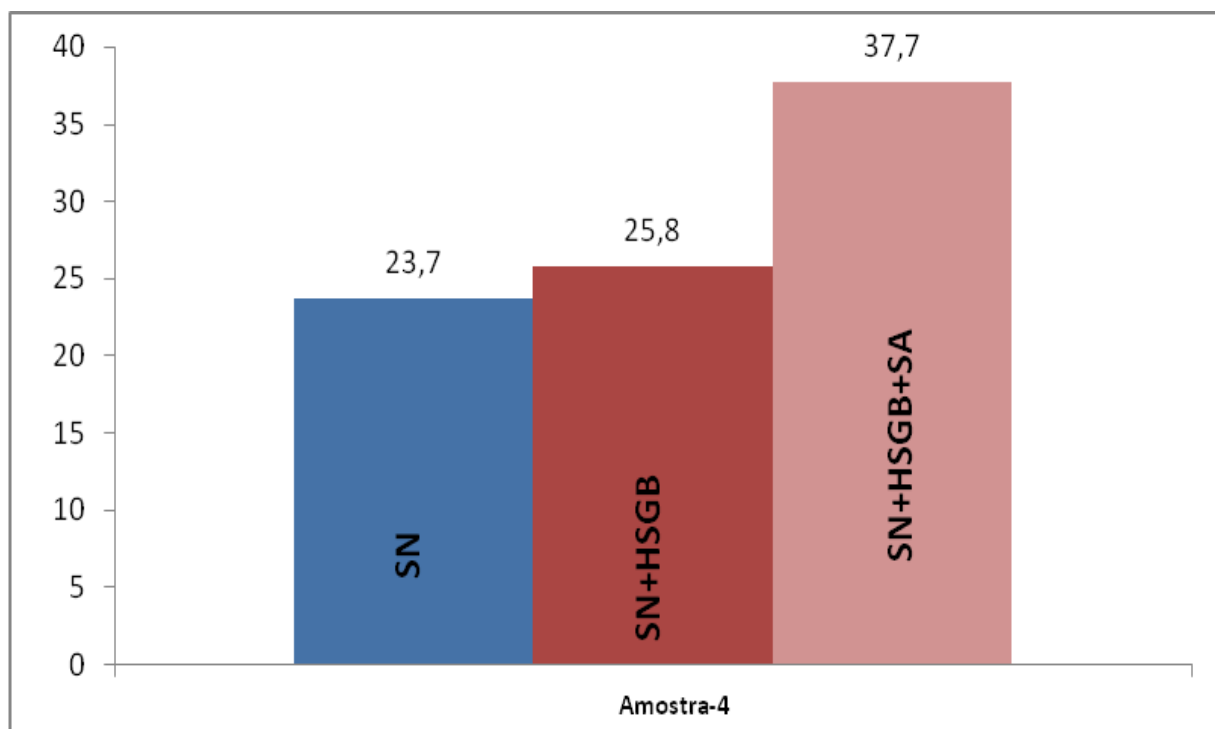


Gráfico 13 – Análise comparativa entre os CBR da Amostra-4

Fonte: O autor

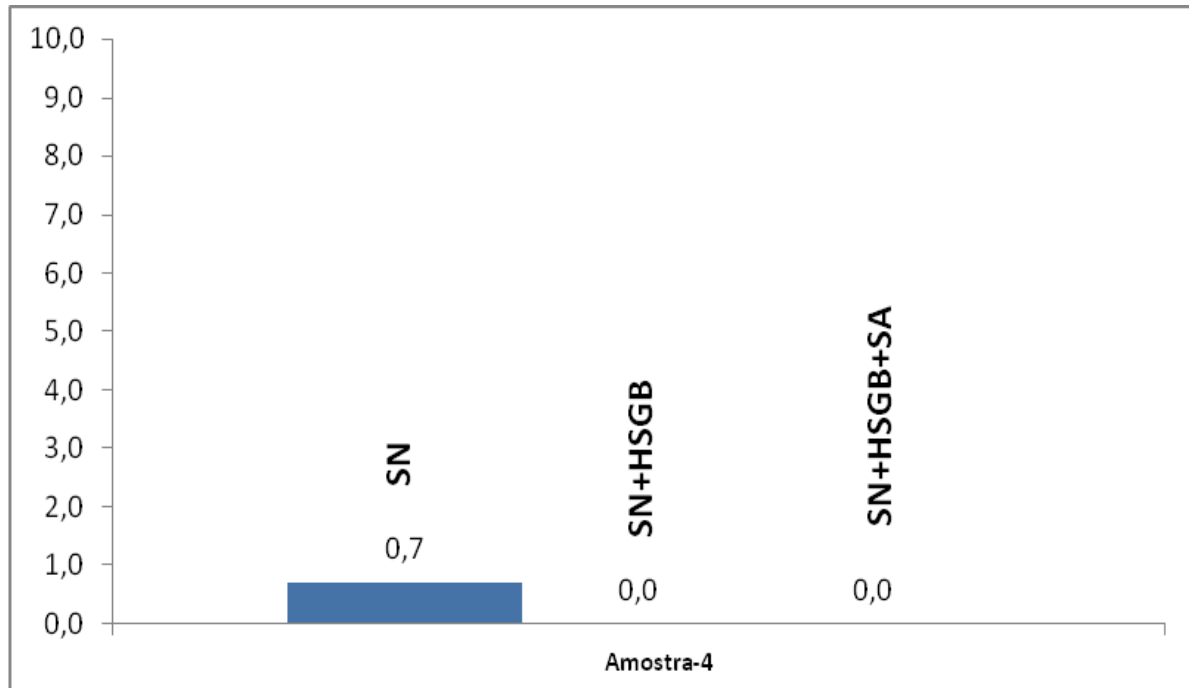


Gráfico 14 – Análise comparativa entre das Expansões da Amostra-4

Fonte: O autor

b) Comparação da tendência de CBR entre o solo natural e solos estabilizados com distintos aditivos

A Amostra-4 foi classificada como seixo e areia siltoso do subgrupo A-2-6 [1], os gráficos 15 e 16 abaixo, demonstram que:

- Na comparação entre os resultados do SN (CBR=23,7 e Exp=0,7) e SN+HSGB (CBR=25,8 e Exp=0,0), verifica-se que anulou o efeito residual da expansão, mas não houve ganho considerável de resistência como era de se esperar, devido a escassez da fracção argila que são promotoras da coesão tornando este solo muito fiável, rompendo sua estrutura sob esforços repetitivos.
- Na comparação entre os resultados do SN (CBR=23,7 e Exp=0,7) e SN+HSGB+SA (CBR=37,7 e Exp=0,0) verifica-se que houve ganho de resistência em cerca de 59%. Este ganho deve-se a presença da fracção areia que fornece a parcela da resistência ao cisalhamento através do atrito intergranular e a coesão da pequena fracção da argila.

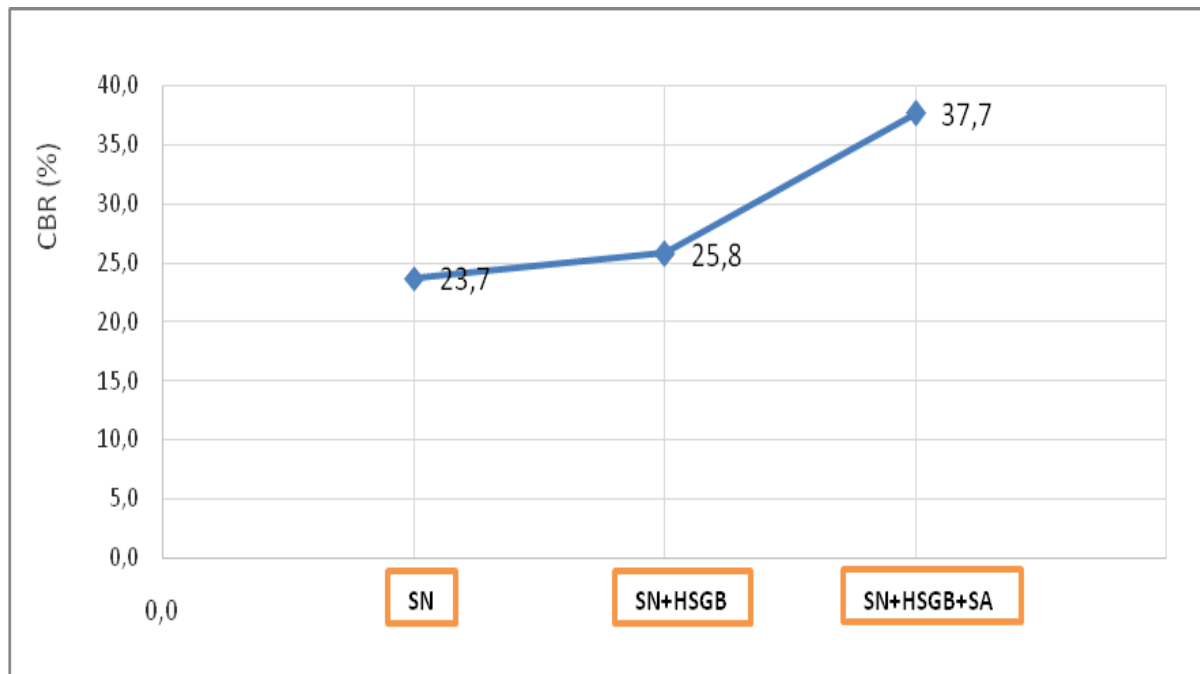


Gráfico 15 – Análise com linha de tendência do CBR da Amostra-4

Fonte: O autor

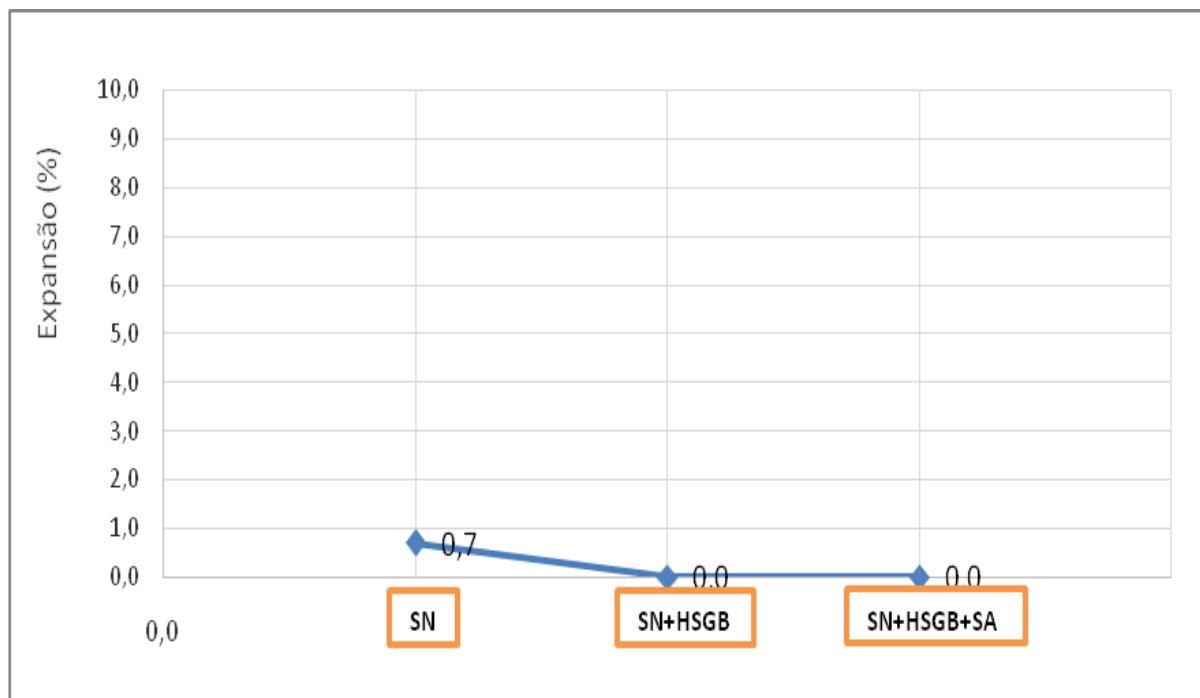


Gráfico 16 – Análise com linha de tendência das Expansões da Amostra-4

Fonte: O autor

4.7. CONSUMO DO ESTABILIZANTE EM OBRA

A Amostra-1 (Boane – Salamanga, Km 33) pertence ao grupo de solos com predominância da fracção argila siltosa e Amostra-2 (Ilha Josina Machel) pertencem ao grupo de solos com predominância da fracção argila mas apenas Amostra-2 receberá o tratamento com o estabilizante HomysoloGb na proporção de 1:1.500 em relação ao peso, mais 3% de Cimento, enquanto a Amostra-1 será estabilizada somente com 2% de Cimento.

As Amostra-3 (Aterro de Beluluane) e Amostra-4 (Boane – Salamanga, Km 37) pertencem ao grupo de solos com predominância da fracção areia e receberão o tratamento com o estabilizante HomysoloGb na proporção de 1:1.000 em relação ao peso, mais reagente/catalisador Sulfato de Alumínio a 1:5.000 em peso.

Assim, para uma estrada de 1 quilómetro de extensão, 7 metros de largura e 0,15 metros de espessura, teremos os seguintes consumos de estabilizantes:

4.7.1. Amostra-1

Consumo de Cimento Portland

- $1,941\text{Kg/m}^3$ de solo compactado
- 2% de Cimento Portland
- $1,941 \times 0,15 = 291,5\text{Kg/m}^2$ do solo/cimento
- $291,5 \times 0,02 = 5,823\text{Kg}$ de cimento/ m^2
- $5,823 \times 1.000 \times 7,0 = 40.761\text{Kg}$ de cimento $\rightarrow 40.761/50 = 815,2 \approx 815$ sacos de Cimento Portland por cada quilómetro de estrada.

4.7.2. Amostra-2

Consumo de HomysoloGb

- $1,676\text{Kg/m}^3$ de solo compactado
- Proporção de 1:1.000 em peso de estabilizante
- $1,676 \times 0,15 = 0,251\text{ml/m}^2$
- $0,251 \times 1.000 \times 7,0 = 1.757$ litros $\rightarrow 1.757$ tambores de estabilizante HomysoloGb
- $1.757 \times 0,01 = 17,57$ litros do Produto HomysoloGb por cada quilómetro de estrada

Consumo de Cimento Portland

- $1,676\text{Kg}/\text{m}^3$ de solo compactado
- 2% de Cimento Portland
- $1,676 \times 0,15 = 251,4\text{Kg}/\text{m}^2$ do solo/cimento
- $251,4 \times 0,02 = 5,028\text{Kg}$ de cimento/ m^2
- $5,028 \times 1.000 \times 7,0 = 35.196\text{Kg}$ de cimento $\rightarrow 35.196/50 = 703,9 \approx 704$ sacos de Cimento Portland por cada quilómetro de estrada.

4.7.3. Amostra-3

Consumo de HomysoloGb

- $1,962\text{Kg}/\text{m}^3$ de solo compactado
- Proporção de 1:1.000 em peso de estabilizante
- $1,962 \times 0,15 = 0,294\text{ml}/\text{m}^2$
- $0,294 \times 1.000 \times 7,0 = 2.060$ litros $\rightarrow 10,30$ tambores de estabilizante
- $1.757 \times 0,01 = 20,60$ litros do Produto HomysoloGb

Consumo de Sulfato de Alumínio

- $1,632\text{Kg}/\text{m}^3$ de solo compactado
- Proporção de 1:5.000 em peso de estabilizante
- $1,962 \times 0,15 = 0,251\text{ml}/\text{m}^2$
- $0,251 \times 1.000 \times 7,0 = 1.757$ litros $\rightarrow 8,79$ tambores de estabilizante
- $1.757 \times 0,01 = 17,57$ litros do Produto Sulfato de Alumínio

4.7.4. Amostra-4

Consumo de HomysoloGb

- $1,956 \times 0,15 = 0,293\text{ml}/\text{m}^2$
- $0,293 \times 1.000 \times 7,0 = 2.054$ litros $\rightarrow 10,27$ Tambores de 200 litros/cada
- $1.757 \times 0,01 = 20,54$ litros do Produto HomysoloGb

Consumo de Sulfato de Alumínio

- $1,956 \times 0,15 = 0,251\text{ml}/\text{m}^2$
- $0,251 \times 1.000 \times 7,0 = 1.757$ litros $\rightarrow 8,79$ Tambores de 200 litros/cada

$1.757 \times 0,01 = 17.57$ litros do Produto HomysoloGb

4.8. APLICABILIDADE DE SOLOS ESTABILIZADOS COM HOMYSOLOGB

Após a compactação e a raspagem da superfície, nota-se pó solto sobre a superfície. Antes da aplicação de emulação asfalto querosene para formação de uma camadinha superficial de solo impregnado de asfalto para garantir a adesão da capa, é necessária a varrição para eliminação dos montículos de solo solto.

A figura abaixo mostra que esta superfície não foi varrida, e o pó solto da superfície acabou por formar lama. O pavimento pode ser lavado, com a utilização da “vassoura de água” para remoção do pó solto. Quando a base for submetida ao tráfego sem revestimento, o atrito entre o pneu e a superfície da pista acaba por arrancar partículas que, soltas, formam esta lama que possibilita derrapagens, sendo muito prejudicial em curvas muito fechadas (raio mínimo) ou em rampas muito inclinadas.

Para compensar este efeito, recomenda-se o espalhamento de pedra britada de 1 polegada de dimensão máxima, à razão de 15 litros por metro quadrado, nos locais onde seja necessário, antes do início da compactação, para integrá-la à superfície da camada, oferecendo assim maior atrito e segurança ao tráfego.



Figura 8 – Pavimento estabilizado com aditivo HomysoloGb em tempo seco
Fonte: ROESSLER, 2016, Manual de laboratório IQSCTC



Figura 9 – Pavimento estabilizado com aditivo HomysoloGb em tempo húmido
Fonte: ROESSLER, 2016, Manual de laboratório IQSCTC

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. CONCLUSÃO

A pesquisa teve como objectivo analisar o desempenho de solos coesivos estabilizados com o produto HomysoloGb nas seguintes condições:

- a) Solos com predominância da fracção argila quando estabilizado com aditivo HomysoloGb e aglomerante Cimento Portland.
- b) Solos com predominância da Areia quando estabilizado com aditivo HomysoloGb e reagente/catalisador Sulfato de Alumínio.

Do estudo, concluiu-se que:

- **Para solos com predominância da fracção argila com silte estabilizado com aditivo HomysoloGb (HSGB) e Cimento Portland (CP)**
 - O solo natural (SN) cujo CBR é de 12.4, expansão (Exp) de 6.9, quando adicionado 2% Cimento portland (CP), o CBR aumentou para 84.6%, e a expansão fixou-se em 0.4; e quando adicionado ainda o estabilizante HomysoloGB (HSGB), o CBR aumentou ate 87.6%, e a expansão (Exp) fixou-se em zero, o que indicou que o efeito deste estabilizante HomysoloGb (HSGB) sobre a resistência é reduzido, embora tenha anulado o efeito expansivo em 100%;
 - Assim, concluiu-se que este solo permanecerá impermeabilizado, com o ganho de resistência devido tão-somente à adição de aglomerante cimento Portland;
- **Para solos com predominância da fracção argila estabilizado com aditivo HomysoloGb (HSGB) e Cimento Portland (CP)**
 - Para solos com predominância de argila, o SN (CBR=3,4 e Exp=8,2) e SN+HSGB (CBR=4,1 e Exp=1,3), verificou-se que não houve ganho considerável de resistência,

- mas a expansão anulou significativamente em 85%. Mas já na comparação entre os resultados de SN+CP (CBR=21,3 e Exp=3,3) e SN+HSGB+CP (CBR=39,5 e Exp=0,2), verifica-se ganho adicional de resistência em cerca de 86% e anulação do efeito expansivo em 100%. Este solo tem maior quantidade de argila, e o estabilizante HomysoloGb agiu muito bem sobre argila ao proporcionar condições favoráveis para aumento da resistência.
- Assim, conclui-se que este solo permanecerá impermeabilizado devido o estabilizante HSGB, com o ganho de resistência devido à adição 3% do aglomerante cimento Portland.
- **Para solos com predominância da fracção areia estabilizado com aditivo HomysoloGb (HSGB) e Sulfato de Alumínio (SA)**
 - Na comparação entre os resultados do SN (CBR=30,4 e Exp=0,0) e SN+HSGB (CBR=31,9 e Exp=0,0) verifica-se que não houve ganho considerável de resistência, devido a escassez da fracção argila que são promotoras da coesão tornando este solo muito fiável, rompendo sua estrutura sob esforços repetitivos.
 - Na comparação entre os resultados do SN (CBR=30,4 e Exp=0,0) e SN+HSGB+SA (CBR=39,3 e Exp=0,0), verifica-se que houve ganho de resistência em cerca de 29%. Este ganho deve-se a presença da fracção areia que fornece a parcela da resistência ao cisalhamento através do atrito intergranular e a coesão da pequena fracção da argila.
 - Assim, conclui-se que este solo permanecerá impermeabilizado, com o ganho de resistência devido à adição do reagente/catalisador Sulfato de Alumínio ao estabilizante HomysoloGb,
 - **Para solo com predominância da fracção areia siltosa e argila estabilizada com aditivo HomysoloGb (HSGB) e Sulfato de Alumínio (SA)**
 - Na comparação entre os resultados do SN (CBR=23,7 e Exp=0,7) e SN+HSGB (CBR=25,8 e Exp=0,0), verifica-se que anulou o efeito residual da expansão, mas não

houve ganho considerável de resistência como era de se esperar, devido a escassez da fracção argila que são promotoras da coesão tornando este solo muito fiável, rompendo sua estrutura sob esforços repetitivos.

- Na comparação entre os resultados do SN (CBR=23,7 e Exp=0,7) e SN+HSGB+SA (CBR=37,7 e Exp=0,0) verifica-se que houve ganho de resistência em cerca de 59%. Este ganho deve-se a presença da fracção areia que fornece a parcela da resistência ao cisalhamento através do atrito intergranular e a coesão da pequena fracção da argila.
- Assim, conclui-se que este solo permanecerá impermeabilizado, com o ganho de resistência devido à adição do reagente/catalisador Sulfato de Alumínio ao estabilizante HomysoloGb,

5.2. RECOMENDAÇÃO PARA ESTUDOS FUTUROS

Seguintes recomendações podem ser deixadas:

- Criação de troço experimental onde possam ser testados os resultados obtidos em laboratórios;
 - Recomenda-se para Solos com predominância da fracção argila (estabilizado com aditivo HomysoloGb e 3% Cimento Portland), por se atindo um CBR de 30%, o uso deste solo estabilizado como material da base de estradas de baixo volume de tráfego;
 - Recomenda-se para solos com predominância da fracção areia siltosa e argila (estabilizado com aditivo HomysoloGb (HSGB) e Sulfato de Alumínio (SA)), por se atindo um CBR de 30%, o uso deste solo estabilizado como material da base de estradas de baixo volume de tráfego;
- Desenvolvimento no futuro de estudo dos solos com aditivo HomysoloGb e aglomerante Cal Hidratada Seca e ou Cal Hidratada Húmida com intuito de analisar o efeito de CBR e controle da expansão;

- Verificar o efeito da diminuição da energia de compactação na análise do comportamento de amostras quanto ao CBR e expansão;
- Fazer a análise mineralógica dos solos em estudo, durante a caracterização da amostra, a fim de verificar se há algum mineral expansivo;
- Avaliar o efeito dos aditivos para outros tipos de solo da província de Maputo e das restantes províncias de Moçambique, por forma a mapear a informação num banco de dados para a aplicabilidade de solos coesivos estabilizados com aditivos HomysoloGb combinado com o Cimento Portland e ou Cal Hidratada Seca, Cal Hidratada Húmida e Sulfato de Alumínio, em projectos de estradas de baixo volume de tráfego.

BIBLIOGRAFIA

CAPUTO, Homero Pinto. Mecânica dos Solos e suas Aplicações. Rio de Janeiro: Livro Técnico S.A., 1972. v.1.

CAPUTO, Homero Pinto. Mecânica dos Solos e Suas Aplicações. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975. v.2.

CAPUTO, Homero Pinto. Mecânica dos Solos e Suas Aplicações. Rio de Janeiro: LTC, 1998. 6. ed. 234 p. il.

CRISTELO, Nuno Miguel Cordeiro. Estabilização de Solos Residuais Graníticos através das Adição de Cal. 2001. 96f. Dissertação. (Escola de Engenharia) – Universidade do Minho, Portugal.

MARIANO, Evelise Gonçalves. Melhoria das Propriedades Mecânicas de um Solo Estabilizado com Cal, Cimento e CON-AID® Visando Aplicação em Obras de Pavimentação. 2008. 123 f. Monografia (Curso de Engenharia Civil) Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. Estabilização de Solos para Fins de Pavimentação. Minas Gerais, 2005.

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

SENÇO, Wlastermiler de Pavimentação, São Paulo: Grêmio Politécnico, 1979. 2. ed. 452 p. il.

Hussey & Hussey, R. (1977). *Business Research: Pratical Guide For Undergraduate And Post Graduate Students*. Macmillan Press: Hound Mills.

CPP 524 - Ensaios para Controlo de Terraplenagens, LNEC, Lisboa 2011.

PEREIRA, O.A. – Pavimentos Rodoviário, v.1, LNEC, 1999

AZEVEDO, A. L. C., OLIVEIRA, A. JR., PEDROSA, R. A. e RAMALHO, R. W.,

“Estabilização de solos com adição de cal”. Belo Horizonte, 1998. Dissertação de pós graduação. IPC/PUC. 78p.

SÉRGIO FUHRMEISTER ROESSLER, Manual de laboratório – Impermeabilização Química de Solos Coesivos por Troca de Cátions, 2016,

DOCUMENTOS NORMATIVOS

- _ E 218 – Colheita de amostras
- _ E 195 – SOLOS – Preparação por via seca das amostras para ensaio de identificação
- _ E 239 – SOLOS – Análise granulométrica por peneiração húmida
- _ NP 143 – SOLOS – Limites de consistência
- _ E 197 – SOLOS – Ensaio de Compactação
- _ E 198 – SOLOS – Determinação de CBR
- _ E 195 – SOLOS – Classificação para fins rodoviário
- _ E 241 – SOLOS - Terraplenagens