

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
ENGENHARIA CIVIL

LUDMILLA CHAVES SIPAÚBA

**TÉCNICA DE BIOENGENHARIA DOS SOLOS E MÉTODOS TRADICIONAIS: Um
estudo comparativo das possibilidades de aplicação na recuperação de taludes**

São Luís

2016

LUDMILLA CHAVES SIPAÚBA

**TÉCNICA DE BIOENGENHARIA DOS SOLOS E MÉTODOS TRADICIONAIS: Um
estudo comparativo das possibilidades de aplicação na recuperação de taludes**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Me. Danilo Borralho Castro Rosendo
Co-Orientador (a): Dra. Maria Teresinha M. Coelho

São Luís

2016

Sipaúba, Ludmilla Chaves.

Técnicas de bioengenharia dos solos e métodos tradicionais: um estudo comparativo das possibilidades e aplicações na recuperação de taludes. / Ludmilla Chaves Sipaúba. – São Luís, 2016.

81 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Me. Danilo Borralho Rosendo Castro.

1. Recuperação de taludes. 2. Método bioengenharia dos solos.
3. Método tradicional. I. Título.

CDU 624.137.2

LUDMILLA CHAVES SIPAÚBA

**TÉCNICA DE BIOENGENHARIA DOS SOLOS E MÉTODOS TRADICIONAIS: Um
estudo comparativo das possibilidades de aplicação na recuperação de taludes**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da
Universidade Estadual do Maranhão, como requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Civil.

Aprovada em: / /2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Maria Teresinha M. Coelho (orientadora)
Presidente

Prof. Me. Marivaldo Costa Duarte
Membro

Prof. Anderson Nascimento Silva
Membro

AGRADECIMENTOS

Como já dizia Camelo: “É preciso força pra sonhar e perceber que a estrada vai além do que se vê”. Hoje, graças a Deus, vivo a realidade que sempre sonhei, porém não se chegou fim. Ainda é preciso muito esforço, determinação, paciência e perseverança para chegar além de qualquer coisa, além dos nossos sonhos, além do que se vê. Portanto, gostaria de agradecer primeiramente a Deus, pois nada seria de mim sem a fé que eu tenho nele.

Aos meus pais, Artur e Conceição, por toda capacidade de acreditar em mim, sem medir esforços para me proporcionarem a melhor educação. Sempre com muito carinho e amor, tornam meus sonhos em seus.

Ao meu irmão, Artur Júnior, meu maior motivador. Seu cuidado e dedicação foi que deram em alguns momentos, a esperança para seguir.

A todos meus familiares que sempre estão presente comigo vibrando cada conquista. Em especial, a minha afilhada Isabella, minha inspiração constante de querer ser cada vez melhor.

Agradeço também a todos os professores que me acompanharam durante a graduação, em especial ao Prof. Danilo Castro e à Profª. Teresinha Coelho, responsáveis pela realização deste trabalho. Obrigada pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão desta monografia.

Aos amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constante.

A todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena, minha terna gratidão.

“A sabedoria consiste em ordenar bem a nossa própria alma”.

Platão

RESUMO

Este estudo objetivou apresentar as Técnicas da Bioengenharia de Solos utilizadas atualmente e verificar a possibilidade de aplicação das mesmas em obras de recuperação e estabilização de Taludes em obras lineares de grande porte e realizar um comparativo com métodos tradicionais, focado na melhor viabilidade técnica e ambiental, bem como a descrição do uso da bioengenharia dos solos e dos métodos tradicionais de estabilidades de taludes mais utilizados e mais adequados para o estudo em questão. Para tanto foi utilizado como método para coleta de dados a pesquisa bibliográfica e documental, a fim de verificar a viabilidade e a aplicação destas metodologias executivas na região proposta. No presente estudo, pretende-se aplicar esta concepção a um talude em processo erosivo acentuado com carregamento de material fino para o acesso rodoviário, localizado na ferrovia Estrada de Ferro Carajás (km 4 + 800). Primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o assunto caracterizando os diferentes métodos de Bioengenharia e os tradicionais para obras de proteção e recuperação de solos, estabelecendo assim, critérios para aplicação dos mesmos. Em conjunto com a revisão bibliográfica foi realizada uma análise do talude por meio do estudo de caso, contextualizando o histórico da área com suas características geológicas, a fim de propor soluções viáveis economicamente, tecnicamente e ambientalmente. A solução de bioengenharia mostrou-se como a única alternativa viável para o estudo. Foi possível no decorrer do trabalho assimilar seu sucesso na atuação contra erosão, assim como seu papel atuante na própria estabilidade estrutural com meio dos efeitos das raízes.

Palavras-Chaves: Recuperação de Taludes. Método Bioengenharia de Solos. Método Tradicional

ABSTRACT

This study aimed to present the Soil Bioengineering Techniques currently used, to verify the possibility of their application in slope recovery and stabilization works in large linear construction works and to perform a comparison with a traditional method focused on the best technical and environmental feasibility, as well as the description of the use of soil bioengineering and the most used and most suitable traditional methods of slope stabilities for this research. For this purpose, bibliographical and documentary researches were used as a method for data collection in order to verify the feasibility of applying these executive methodologies in the proposed region. In this study, this design is applied to an embankment under a significant erosive process with a loading of thin material for road access, located in a heavy haul railroad in the Brazilian northeast (km 4 + 800). First, a bibliographic review was carried out on the subject, describing the different Bioengineering and Traditional methods for soil protection and recovery works, and establishing criteria for their application. Together with the bibliographic review, an analysis of the slope was carried out through case study, contextualizing the history of the area with its geological features, in order to propose economically, technically and environmentally viable solutions. From the analysis of the data it was possible to carry out the survey of alternative solutions. A bioengineering solution proved to be a viable alternative to the study. It was able to perform a work similar to its success in erosion performance, as well as its role in the structural structure itself with the average of the effects of the roots.

Keywords: Slope Recovery. Soil Bioengineering Method. Traditional Method.

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BR – Brasil

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte

MST – Miniatura compactada tropical

NBR – Norma brasileira

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquema da pesquisa	18
Figura 2: Escoramento de galeria	22
Figura 3: Muro de Arrimo	22
Figura 4: Muro de Arrimo por gravidade	23
Figura 5: Terreno no estado natural.....	23
Figura 6: Corte do terreno.....	24
Figura 7: Início da instabilidade	24
Figura 8: Empuxo total.....	24
Figura 9: Esquema de execução de aterro	25
Figura 10: Geotêxtil não-tecido em fibra de carbono	27
Figura 11: Geotêxtil tecido em polipropileno.....	27
Figura 12: Geotêxtil tecido/sintético/para filtração	28
Figura 13: Geotêxtil não-tecido / em tecido proteção	28
Figura 14: Geogrelha revestimento de estrada	28
Figura 15: Geogrelha de Reforço	29
Figura 16: Seção transversal tipo para muro com sistema de autoenvolvimento com ancoragem superior.....	31
Figura 17: Esquema construtivo	31
Figura 18: Seção transversal tipo para muro com sistema com blocos segmentais	32
Figura 19: Esquema construtivo	32
Figura 20: Colchão drenante.....	34
Figura 21: Forças e variáveis envolvidas nas análises de estabilidade externas	37
Figura 22: Arranjo final a da estrutura de Solo Reforçado com Geogrelha	46
Figura 23: Europa em 1900 com trabalhadores utilizando vegetação para aplicação de técnicas bioengenharia de solos.....	47
Figura 24: Tipos de reforços de taludes por raízes	52
Figura 25: Visão frontal para o Aterro 4 + 800	58
Figura 26: Vista para o acesso rodoviário	58
Figura 27: Mapa geológico, extraído da Carta Geológica do Brasil – Maranhão	61
Figura 28: Localização das sondagens no trecho em estudo	64
Figura 29: Simulação de estabilidade do terreno existente	65
Figura 30: Simulação de estabilidade do aterro em estudo	66

Figura 31: Seção tipo de aterro ferroviário	67
Figura 32: Fluxograma de execução de recuperação do talude	71
Figura 33: Fluxograma referente a equipamentos, ferramentais e materiais utilizados	72
Figura 34: Vista do pé do aterro	74
Figura 35: Crista do talude	75
Figura 36: Corpo do talude	75
Figura 37: Área para regularização.....	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Problemas observáveis em taludes e encostas	26
Quadro 2: Ensaios de caracterização dos solos	35
Quadro 3: Fatores determinantes de projeto	50
Quadro 4: Fator de segurança associado à condições adversas	51
Quadro 5: Principais efeitos hidrológicos.....	53
Quadro 6: Principais características geológicas e geotécnicas	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros do Solo e Muro	36
Tabela 2: Fatores de capacidade de carga.....	41
Tabela 3: Primeira interação por β	43
Tabela 4: Segunda interação por β	44
Tabela 5: Fatores de segurança com respeito ao arrancamento	45
Tabela 6: Parâmetros médios do solo	46
Tabela 7: Valores médios de N_{spt} de acordo com Joppert	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Considerações Iniciais.....	14
1.2 Delimitação do tema	15
1.3 Questão de pesquisa e formulação da resposta provisória ao problema.....	16
1.4 Objetivos	16
1.4.1 Objetivo Geral.....	16
1.4.2 Objetivo Geral.....	16
1.5 Justificativa	17
1.6 Delimitações.....	17
1.7 Limitações	17
1.8 Metodologia do Estudo	17
1.9 Estrutura do Trabalho	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Estabilização de taludes.....	20
2.2 Fatores de estabilidade de taludes	21
2.2.1 Taludes em Solos	21
2.2.2 Taludes em Rocha	21
2.3 Empuxo de terra – Teoria de Coulomb.....	21
2.3.1 Situações Construtivas da atuação do Empuxo Ativo na Instabilidade.....	23
2.4 Método Tradicional: Solos Reforçados	27
2.4.1 Tipos de Métodos construtivos: Faceamento e forma.....	30
2.4.2 Arranjos dos Reforços	33
2.4.3 Sistemas de Drenagem.....	33
2.4.4 Material de Enchimento.....	34
2.4.5 Roteiro de dimensionamento	36
2.5 Bioengenharia dos solos	46
2.5.1 Fatores de elaboração de projeto.....	49
2.5.2 Técnicas de Bioengenharia	53
3 METODOLOGIA.....	54
3.1 Método de pesquisa.....	54
3.2 Classificação do tipo de pesquisa.....	54

3.3 Coleta de dados.....	55
4 ESTUDO DE CASO.....	57
4.1 Histórico do trecho.....	57
4.2 Caracterização geológica.....	59
4.3 Obtenção dos parâmetros de projeto.....	62
5 PROPOSTAS DE SOLUÇÕES TRADICIONAIS E DE BIOENGENHARIA.....	68
5.1 Solução proposta.....	68
5.2 Metodologia da solução	72
5.3 Desenvolvimento da solução proposta	73
5.4 Execução	76
6 CONCLUSÃO.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
ANEXOS	82

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

No Brasil, atualmente, vive-se uma problemática a cerca da implantação de grandes obras lineares por todo país, motivadas pelo papel que elas agregam ao desenvolvimento econômico, em paralelo com o impacto ambiental e social. Essas obras por muitas vezes desafiam empreendedores para reestruturação de áreas degradadas, principalmente se tratando de taludes de corte e aterro para recuperação vegetal.

A engenharia natural, denominada também como bioengenharia dos solos, fundamenta-se na utilização de elementos biologicamente ativos, unidos a elementos inativos em obras de recuperação ou estabilização de solos. Os elementos inativos podem ser constituídos por concretos, polímeros naturais e sintéticos, madeiras e ligas metálicas. Como elementos vivos, pode-se mencionar a vegetação, semeada de acordo com as características locais. Este procedimento de estabilidade utiliza raízes e caules como elementos estruturais e mecânicos para o controle e proteção do solo, assim como na melhoria de drenagem e na limitação das movimentações de terra. (DIAS; SANTOS; GOMES, 2011).

Devido a grande percepção da importância da preservação ambiental que vem acontecendo nos últimos anos, esse tipo de método de estabilização vem se destacando no cenário da construção civil, principalmente nas implantações rodoviárias e ferroviárias que exigem uma grande movimentação de terra, em relação aos efeitos danosos da devastação ambiental. Sendo algumas das particularidades da engenharia natural citadas a seguir, segundo os autores anteriormente citados:

- I. Mínima requisição de máquinas e mais mão de obra com qualificação menor;
- II. Aproveitamento de materiais naturais e locais, como madeiras, pedras, compostos orgânicos que diminuem os custos de transporte, além de benefícios locais;
- III. Afinidade ambiental, pois geralmente requer a utilização mínima de equipamentos e da movimentação de terra ocasionando menores transtornos durante execução;
- IV. Auto reparação devido a capacidade da vegetação de crescimento e regeneração;
- V. Realização em locais de difícil acesso ou inacessíveis para o maquinário e;
- VI. Diminuição da umidade e das poro-pressões geram aumento da estabilidade.

A construção de estradas, sendo rodoviária ou ferroviária, exige grandes movimentos de terra que redefine a topografia da região, resultando em taludes que estão

sujeitos a intempéries do meio, às oscilações pluviométricas e à umidade que se constituem como uma barreira na recuperação vegetal da região afetada, visto que a intervenção do ser humano no meio ambiente vem causando danos irreparáveis ao ecossistema, gerando grandes catástrofes ambientais. Logo, a proteção e recuperação vegetal por meio de métodos alternativos utilizando até mesmo os próprios recursos ambientais tem função de minimizar os impactos sofridos durante a implantação da obra, os processos erosivos naturais e acelerados pela intervenção construtiva, a fim de garantir a estabilidade das estruturas implantadas, assim como melhorar o aspecto visual da área.

Além da problemática da degradação ambiental em torno das implantações de estradas, há outra questão, a instabilidade de encostas. Acidentes catastróficos estão acontecendo de forma recorrente nos últimos anos, expondo vidas em risco. Períodos com grande nível pluviométrico têm se configurado como uma verdadeira preocupação para a população, pois se trata do momento que as encostas ficam mais vulneráveis aos escorregamentos, devido a redução da resistência ao cisalhamento pelo aumento excessivo da poro – pressão do solo.

A acessibilidade a este tipo de método torna-se fundamental, uma vez que, a intromissão do homem no meio ambiente vem gerando danos irremediáveis ao planeta, provocando poluição e catástrofes ecológicas. A bioengenharia de solos tem como objetivo amenizar os conflitos entre a expansão e proteção da natureza, permitindo, por exemplo, a construção de uma ferrovia sem causar tantos efeitos negativos ao longo dos cortes e aterros inevitáveis para execução da mesma, como aconteceu na implantação de um projeto de proteção vegetal em um talude de aterro da Ferrovia Transnordestina no município de Missão Velha, Ceará, Brasil. Logo, com o objetivo de identificar a viabilidade de uma técnica de bioengenharia dos solos, neste trabalho é apresentada uma nova proposta de solução em comparativo com outra clássica para recuperação de um talude rompido no km 4+ 800 de uma estrada de ferro nordestina de carga pesada.

1.2 Delimitação do tema

Estudo comparativo para recuperação de Taludes na aplicação dos métodos baseados em técnicas de bioengenharia dos solos e os métodos tradicionais.

1.3 Questão de pesquisa e formulação da resposta provisória ao problema

A questão de pesquisa deste trabalho é: ao contrapor um resultado de método clássico de estabilidade de taludes e outra com base nos fundamentos da engenharia natural, quais são as divergências de métodos construtivos entre as duas soluções?

Diante do crescimento urbano e ocupação desordenada, torna-se cada dia mais recorrente a realização de obras civis em áreas de risco, o que torna a problemática que envolve estabilidade e recuperação de taludes um assunto de extrema importância. Técnicas de bioengenharia têm por objetivo principal diminuir os danos causados pela construção ao meio ambiente, assim como proporcionar maiores possibilidades de soluções de problemas. A implantação de estradas é inevitável, assim a execução de cortes e aterros no terreno ao longo destas obras, com soluções de engenharia natural é possível diminuir os impactos ambientais, recuperando até áreas degradadas, como também na contemplação da necessidade de estabilidade que o terreno exige.

1.4 Objetivos

Os objetivos deste trabalho estão classificados em geral e específicos e são apresentados nos próximos itens.

1.4.1 Objetivo Geral

Apresentar técnicas da Bioengenharia de Solos e Métodos Tradicionais utilizados atualmente e verificar a possibilidade de aplicação das mesmas em obras de proteção e recuperação de taludes em obras lineares de grande porte.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Descrever o método tradicional aplicado a recuperação de taludes;
- b) Retratar o uso da bioengenharia dos solos;
- c) Apontar resultados de um estudo de caso aplicado a um determinado talude.

1.5 Justificativa

O tema escolhido para a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso iniciou-se a partir do interesse em aprofundar o conhecimento na área da Engenharia de Solos, especialmente nos temas relacionados à recuperação de taludes de corte e aterro, onde há a possibilidade de aplicar o aprendizado teórico ao aprendizado prático, desenvolvidos ao longo do curso de graduação.

O assunto proposto por este trabalho busca expor à comunidade acadêmica, métodos alternativos de recuperação em Taludes, que minimizem os possíveis impactos causados nas implantações de grandes obras lineares, sendo assim, de suma importância para à comunidade científica, abordando tópicos importantes e necessários para melhor compreensão dos métodos, destacando as possibilidades de aplicação em um determinado talude, objeto de estudo deste trabalho.

Simultaneamente, enfatizar a importância da busca de meios naturais atrelados à tecnologia que a Engenharia nos proporciona para edificarmos obras com o menor impacto possível, priorizando primeiramente o respeito pelo meio ambiente e por toda população envolvida.

Ressaltando-se, que este trabalho não tem a pretensão de esgotar o assunto referente ao conteúdo da área, visto que são conteúdos extensos e muito abrangentes.

1.6 Delimitações

O presente trabalho está delimitado a um estudo de caso de um determinado talude rompido no km 4 + 8000 de uma ferrovia de carga pesada no nordeste brasileiro e as soluções estudadas serão de bioengenharia de solos e métodos clássicos mais utilizados.

1.7 Limitações

A forma de obtenção da topografia e sondagens, as quais são feitas por empresas terceirizadas, logo não foi possível o acompanhamento das mesmas.

1.8 Metodologia Do Estudo

Para alcançar o objetivo exposto anteriormente, foram implementadas as seguintes etapas, enumeradas e descritas a seguir:

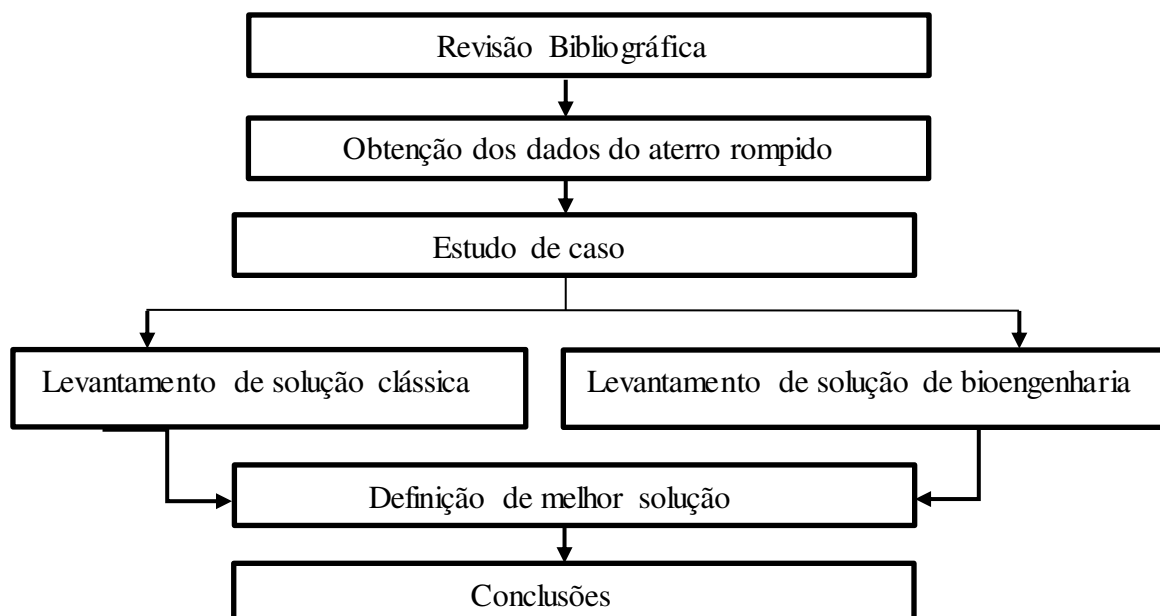
- a) Pesquisa Bibliográfica;
- b) Reconhecimento geológico-geotécnico da área;
- c) Estudo de caso do talude;
- d) Análise das soluções: solução tradicional e solução de bioengenharia;
- e) Escolha da melhor solução para cada método;
- f) Conclusões.

Como procedimento de pesquisa, utilizou-se o método documental e bibliográfico, a fim de verificar a viabilidade de aplicação dessas metodologias executivas na região proposta. Primeiramente, foi feita uma revisão bibliográfica sobre o assunto, caracterizando os diferentes métodos de Bioengenharia para obras de proteção e recuperação dos solos, estabelecendo os critérios para aplicação dos mesmos, e da mesma forma em relação ao método tradicional.

É necessária a realização de pesquisas e levantamentos de campo para mapear o tipo de solução que melhor se adapta em cada trecho de acordo com as características do solo e clima da região, alinhados com os dados topográficos do terreno do trecho em estudo. Este levantamento topográfico foi realizado por uma empresa terceirizada, não sendo possível seu acompanhamento.

Na figura 1 apresentam-se esquematicamente as etapas previstas para o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa



1.9 Estrutura Do Trabalho

O trabalho foi estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1 – introdução, expondo as principais problemáticas que acerca o tema proposto, formulação do problema de pesquisa, objetivos, justificativa e metodologia.

Capítulo 2 – revisão bibliográfica sobre o método clássico por meio de um estudo mais aprofundado sobre muros de solo reforçado, realizando um comparativo com a bioengenharia de solos, expondo suas principais características e determinantes para o sucesso da técnica.

Capítulo 3 – é apresentado a metodologia fundamentada do trabalho.

Capítulo 4 – aborda o local de estudo, dando um sucinto histórico do terreno e designando como foram obtidos os critérios de projeto.

Capítulo 5 – descrevem o desenvolvimento das possíveis soluções tradicionais e de engenharia natural.

Capítulo 6 – são apresentadas as conclusões que surgiram com a composição deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estabilização de taludes

A Estabilidade de maciços de terra na construção civil representa sempre um elevado ônus no orçamento total de um projeto de estradas, sendo rodoviário, ferroviário, ou até mesmo em edificações próximas de encostas onde deverá ser devidamente considerada no custo final. Logo é de fundamental importância o conhecimento de fatores que cercam a problemática, os métodos de melhor viabilidade técnica, econômica e ambiental, enquadradas em suas respectivas condições.

Vários autores tem retratado essa temática, Hart apud Guerra (2013) evidencia que os movimentos de massa são resultados da força de cisalhamento nas encostas causada pela gravidade, peso do material e água no solo, que consegue superar a resistência dos materiais, determinada por propriedades de coesão dos solos nas encostas. O autor ainda classifica estes movimentos de várias maneiras, e a forma mais simplória delas é que se divide em: fluxos (*flows*), deslizamentos (*slides*) e quedas (*falls*).

Portanto, os movimentos de terra têm sido amplamente estudados por geólogos, geomorfólogos, e engenheiros, em diferentes perspectivas, porém todos inquietos em compreender o processo, para propor formas de prognosticá-los, pois muitas vezes são catastróficos e, conseqüentemente, devem ser evitados. (Guerra apud Morgan, 2005). Entende-se então que os processos de movimentos de massa têm um efeito imediato na utilização da terra e podem, em casos limites, estabelecer ameaças à vida da população e às obras.

Segundo Moliterno (1980, p.1), o responsável técnico da obra, antes de elaborar um projeto de contenção de um talude, deve buscar bibliografias geológicas da região onde deverá ser implantada a obra. De modo que deve-se atentar para o histórico de comportamentos similares já concretizados, particularmente em trechos de terra em situações de diaclases preenchidas com as chamadas “micas” e nas bases de maciços de rocha compostas por material alterado denominado por “COLÚVIO”, mais conhecido como Talus.

Segundo o mesmo autor anteriormente citado, os métodos para melhorar o equilíbrio de forças atuantes nos taludes são diversos e enumerados a seguir:

- a) Atenuação da declividade pelo método de Retaludamento;
- b) Implantação de sistemas de Drenagem superficial e profunda;

- c) Estacas pranchas;
- d) Muros de arrimo;
- e) Ancoragem e Atiramento;
- f) Solo Reforçado;
- g) Revestimento focado para controle de erosão.

2.2 Fatores de estabilidade de taludes

A estabilidade de um talude está sujeito aos seguintes fatores:

2.2.1 Taludes em Solos

De acordo Moliterno (1980, p.05), os taludes em solos, são taludes de forma natural ou artificial em solos e tem como determinantes as propriedades físicas e mecânicas da composição dos elementos formadores do solo; a forma geométrica do talude interfere também na elaboração de solução de estabilidade, assim como conhecimento das áreas adjacentes; há grande influência também da pressão da água causada de forma direta e indireta devido aos efeitos hídricos.

2.2.2 Taludes em Rocha

Segundo Moliterno (1980, p.05), os taludes em rocha são formados por maciços rochosos que tem por principais características a distribuição da descontinuidade das camadas e tensões das massas de terra de natureza interna.

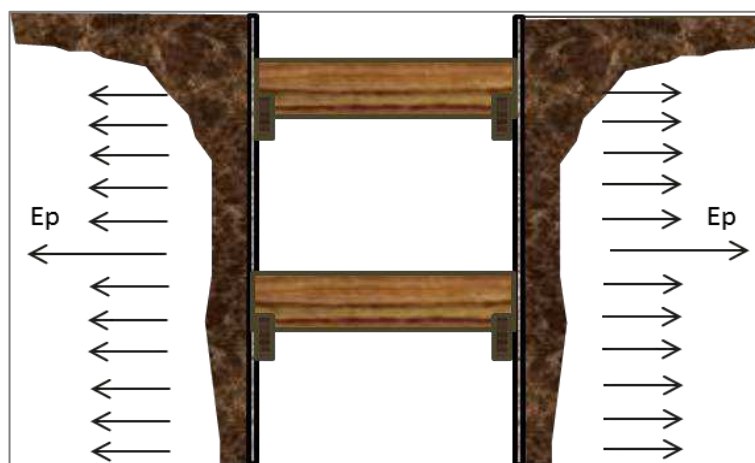
Logo, entende-se que no processo de formação de um Talude há inúmeros fatores que agem de forma conjunta ou isolada, sendo os responsáveis pela estruturação característica deste mesmo. E segundo Marangon (2006), estes fatores podem ser modificados por variáveis ambientais.

2.3 Empuxo de terra – Teoria de Coulomb

A Teoria de Empuxo de solos de acordo com a teoria de Coulomb (1776), segundo a obra “Caderno Muro de Arrimo” (MOLITERNO, 1980), baseia-se na análise de forças atuantes de forma ativa ou passiva contra os muros de arrimo. O muro de arrimo é uma das

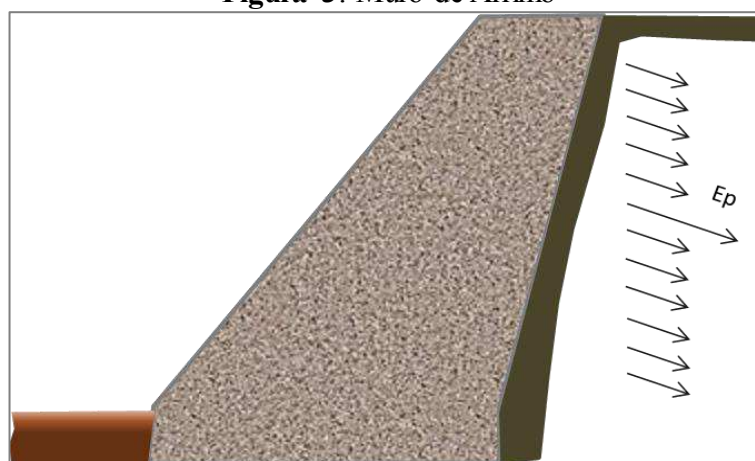
técnicas mais antigas e utilizadas para resistir à pressão lateral do solo quando há uma mudança na sua elevação que excede o ângulo de repouso do solo. O empuxo considerado como ativo é aquele onde a resultante da pressão da terra é contra o muro, já o empuxo passivo acontece quando as forças atuam do muro contra a terra. Casos comuns desse tipo de empuxo (passivo) acontecem nos escoramentos de valas e galerias. Nas figuras 2 e 3 são apresentados exemplos de obras onde atua o empuxo passivo. Já na figura 4 observa-se o empuxo ativo em um muro de arrimo de gravidade.

Figura 2: Escoramento de galeria

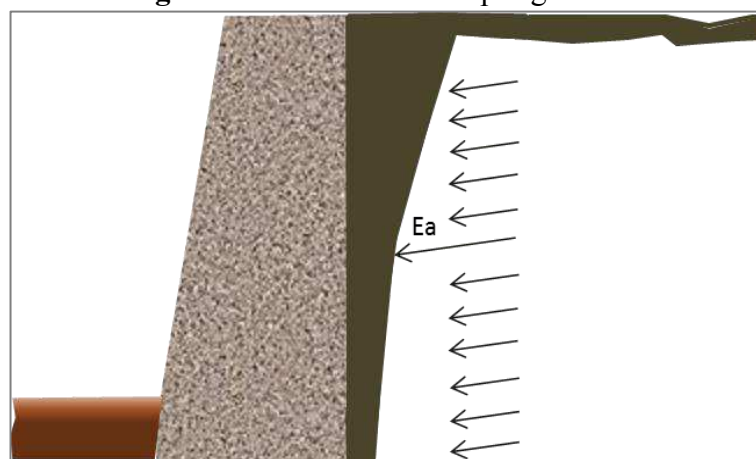


Fonte: Adaptado de Moliterno, 1980

Figura 3: Muro de Arrimo



Fonte: Adaptado de Moliterno, 1980

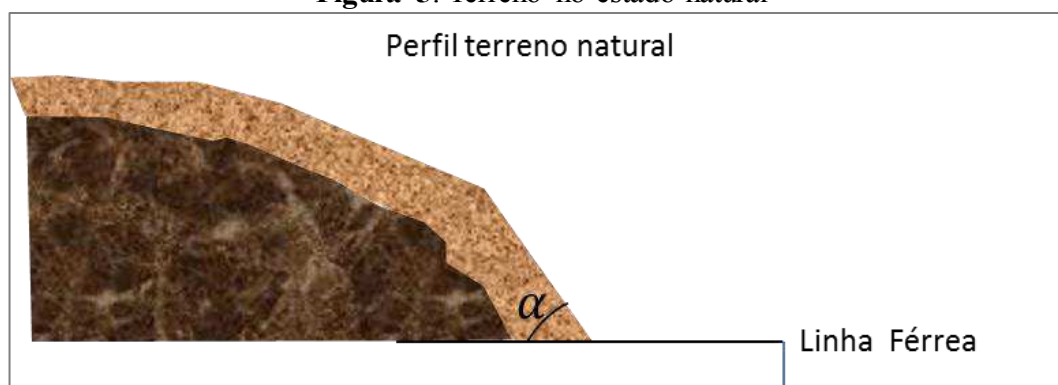
Figura 4: Muro de Arrimo por gravidade

Fonte: Adaptado de Moliterno, 1980

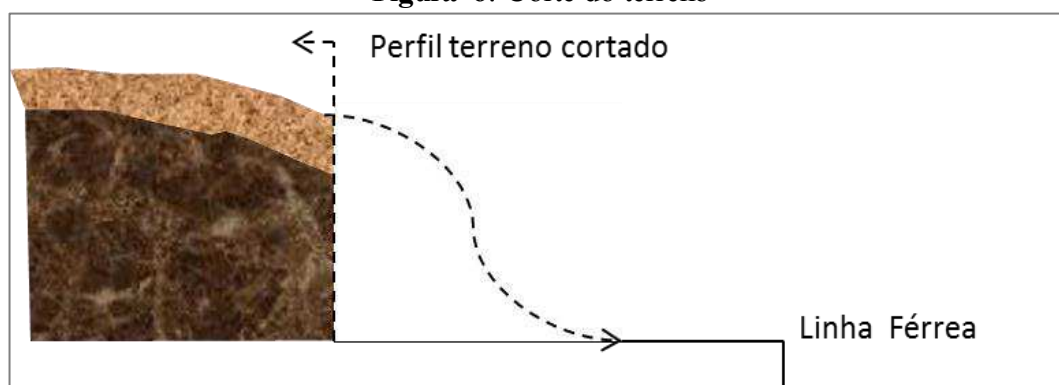
2.3.1 Situações Construtivas da atuação do Empuxo Ativo na Instabilidade

a) Corte em um Projeto Ferroviário

Considerando de forma hipotética a implantação de uma linha férrea, onde é necessária uma sucessão de cortes e aterros. Admite-se primeiro a análise em um trecho da ferrovia que fora feito um corte no seu estado natural de repouso como mostra o esquema nas figuras 5 e 6.

Figura 5: Terreno no estado natural

Fonte: Adaptado de Moliterno, 1980

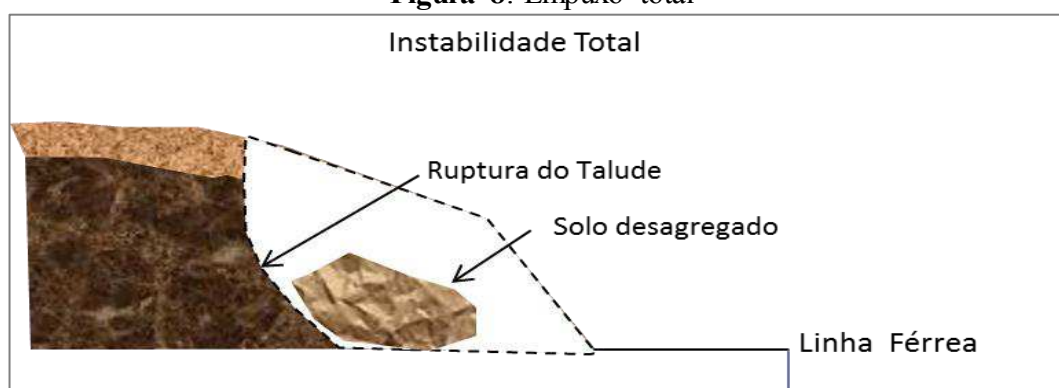
Figura 6: Corte do terreno

Fonte: Adaptado de Moliterno, 1980

É possível após um tempo a observância de algumas mudanças na estrutura do corte, como o aparecimento de fissuras no terreno adjacente na parte superior, o que já reflete os primeiros sinais do empuxo (ver Fig. 7). Poderá haver também um deslocamento da superfície cortada pela fragmentação do solo, tornando-se um cenário de instabilidade (ver Fig. 8).

Figura 7: Início de Instabilidade

Fonte: Adaptado de Moliterno, 1980.

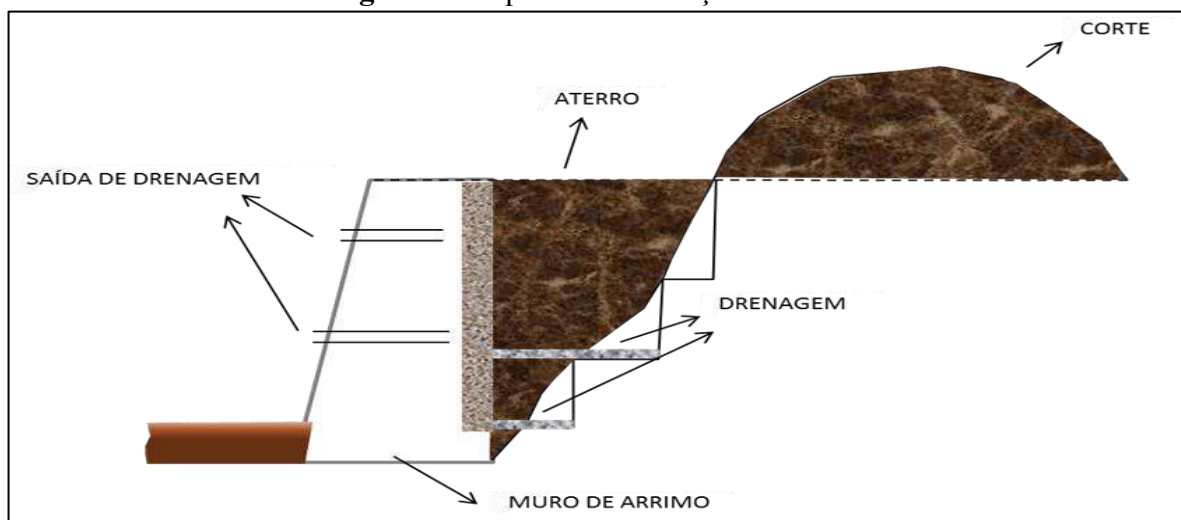
Figura 8: Empuxo total

Fonte: Adaptado de Moliterno, 1980.

b) Aterro em um Projeto Ferroviário

Imaginando a construção de um aterro na mesma situação anterior, onde se deseja aplanar um trecho da forma apresentado na Figura 9.

Figura 9: Esquema de execução de aterro



Fonte: Adaptado de Moliterno, 1980

A colocação de terra em “X” pela compensação feita “Y” causa como efeito a expansão da terra já que se trata de uma terra naturalmente adensada de um corte. Sendo lançada e depositada como material solto em “X”, é natural sua busca por um estado de repouso. Porém isso ocorrerá até um determinado limite, pois com contínuo enchimento de terra levará ao rompimento de uma zona limite onde o solo passará a atuar contra o muro, causando o empuxo. Ainda tratando se de execução, é obrigatório a realização de um sistema de drenagem ao longo da altura do muro devido o excesso de umidade e o encharcamento do solo em épocas de grande intensidade pluvial.

Para uma melhor compressão acerca das problemáticas detectadas em taludes oriundas de Implantação de projeto ferroviário é apresentado o Quadro 1:

Quadro 1: Problemas observáveis em taludes e encostas

Problemas observáveis em taludes/ encostas		
Problema	Forma de ocorrência	Principais causas
Erosão	Em taludes de corte e aterro (em sulcos ou diferenciadas)	– Deficiência de drenagem; – Deficiência de proteção superficial.
	Longitudinal na plataforma	Concentração de água superficial
	Associada a obras de drenagem	Concentração da água superficial ou interceptação do lençol freático
	Erosão interna em aterros (piping)	Deficiência ou inexistência de drenagem interna
Escorregamento de Corte	Ruptura rotacional ou translacional	Inclinação acentuada; Relevo enérgico.
	Ruptura em cunha ou formas variadas	Descontinuidades do solo e rocha
	Movimentos diversos, deflagrados normalmente por precipitações de longa duração.	Saturação do solo
	Movimentação de grandes dimensões e generalizada	– Evolução por erosão; – Corte de corpo de tálus; – Alteração de drenagens.
Escorregamento de Aterro	Atingindo a borda do aterro	Compactação inadequada
	Atingindo o corpo do aterro	Deficiências de fundação
		Deficiências de drenagem
		Rompimento de bueiro
Recalque em Aterro	Deformação vertical da plataforma	Inclinação inadequada
		Deficiências de fundação
		Deficiências de drenagem
		Rompimento de bueiro
Queda de blocos	Queda livre	Compactação inadequada
Rolamento de blocos	Movimento do bloco por rolamento no corte ou encosta	Ação de água ou raízes nas descontinuidades do maciço rochoso
		Descalçamento da base por erosão

Fonte: IPT apud Vale (2003)

2.4 Método Tradicional: Solos Reforçados

No desenvolvimento de soluções voltadas para obras de contenção em solos reforçados nas últimas décadas, criou-se diversos tipos de geossintéticos a serem utilizados em sistemas de estabilidade, categorizados de duas formas: geotêxteis e geogrelha. Dentre estas categorias mencionadas, há mais subdivisões como: geogrelhas rígidas e flexíveis; geotêxteis tecidos, não tecidos e reforçados; geocélulas, geobarras. Para taludes de declividade bastante elevada, as geogrelhas e os geotêxteis dispõem de uma atribuição mais expressiva no aspecto construtivo de muros e reforços.

A escolha de um determinado tipo de reforço em um projeto de sistema de contenção em solo reforçado passa pela análise do desempenho econômico, uma vez que qualquer produto pode ser utilizado, desde que as propriedades econômicas e reológicas sejam reconhecidas. Entretanto, existem algumas condições estruturais ou características do meio que favorecem determinados elencos de geossintéticos e, por isso, devem ser observados na escolha do tipo de produto ou de polímero a ser adotado. (Becker, 2009).

Figura 10: Geotêxtil não-tecido em fibra de carbono



Fonte: ARCHIEXPO

Figura 11: Geotêxtil tecido em polipropileno



Fonte: ARCHIEXPO

Figura 12: Geotêxtil tecido / sintético / para filtração



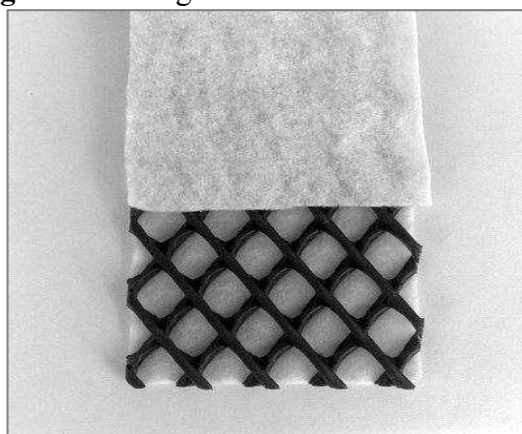
Fonte: ARCHIEXPO

Figura 13: Geotêxtil não-tecido / em tecido proteção



Fonte: ARCHIEXPO

Figura 14: Geogrelha revestimento de estrada



Fonte: ARCHIEXPO

Figura 15: Geogrelha de Reforço



Fonte: ARCHIEXPO

Entre as condicionantes na escolha do tipo de geossintéticos para aplicação como reforço serão citadas as principais: altura; deformação; intemperismo. Para maiores alturas, maiores serão as tensões exigidas nos reforços.

Logo, baseados em históricos de aplicação e pesquisa, as geogrelhas se apresentam como as mais favoráveis para muros com altura acima de 4 m, no mesmo momento que para muros de menor altura os geotexteis conciliam melhores deposições econômicas para a mesma. (BECKER, 2009)

Para situações onde a deformação da estrutura após a finalização da obra é indesejável, as geogrelhas são mais indicadas. Quanto às atividades químicas dos solos ou do meio, gera-se outro fator importante na escolha do tipo de geossintético. Em ambientes com muita diversidade química, as geogrelhas se apresentam como melhor opção pela sua menor sensibilidade quanto ao meio onde está inserido. (BECKER, 2009)

Segundo o autor anteriormente citado, devem ser considerados também como fator de escolha os danos mecânicos de instalação. Solos com grãos angulosos avaria de forma acentuada geotexteis tecidos do que os não tecidos. Enquanto as geogrelhas rígidas sofrem menos dano físico que as flexíveis. Condicionantes que devem ser levados em consideração na prescrição do tipo de solo para situação característica de projeto.

Visando um ótimo desempenho, tanto para esta como para todas as situações de implantação de projeto, a coleta de dados referentes às características do local por meio do

reconhecimento geológicos e/ou geotécnicos é fundamental. Medidas como análise de mapas geológicos, ensaios de sondagens, estudos ou trabalhos relativos a aspectos geológicos – geotécnicos são pré-requisitos para o início de qualquer projeto que tange a possível interferência no comportamento dos solos.

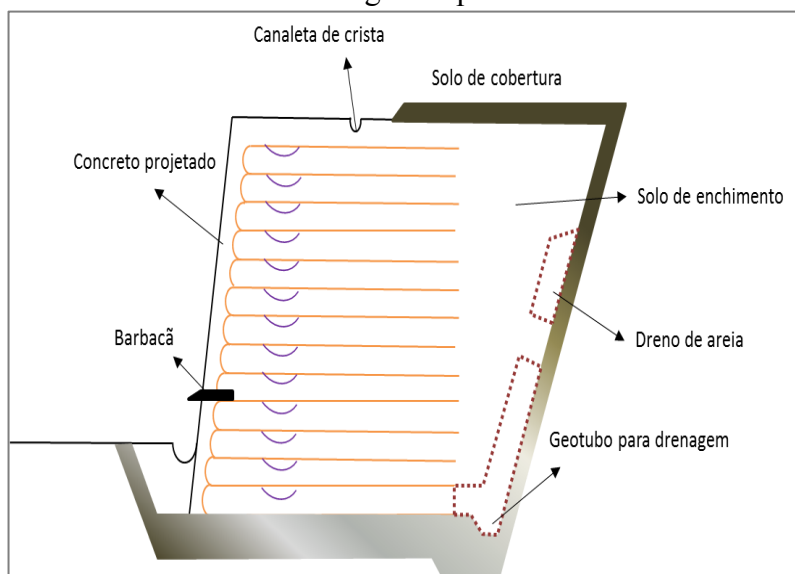
2.4.1 Tipos de Métodos construtivos: Faceamento e forma

Historicamente, o método construtivo mais utilizado para execução dos produtos poliméricos é a técnica de autoenvelopamento. Porém, outros segmentos de forma e faceamento foram desenvolvidos ao longo dos anos, já bastante utilizados de acordo com suas necessidades e que serão discutidos a seguir:

a) Sistemas autoenvelopados

O procedimento baseia-se na estruturação entre o próprio geossintético e o solo, o arranjo entre duas camadas de reforço onde o polímero confina o maciço de terra por meio de dobras e ancoragem no interior da estrutura. Para taludes com grandes aclividades, o reforço é executado com o apoio de fôrmas laterais leves e removíveis para o sistema definitivo de proteção da face. Há dois tipos básicos de construção caracterizados pela posição de ancoragem, sendo denominados de ancoragem na base ou no topo da camada (Ver Fig. 16). Quanto ao faceamento definitivo pode ser tanto de alvenaria, concreto projetado ou tantas outras técnicas. O diferencial de execução nesta etapa é o levantamento da parede levemente afastada da estrutura de solo reforçado a fim de amenizar os efeitos de deformação pós-construção, não prejudicando possivelmente a estética do muro. (Becker, 2009)

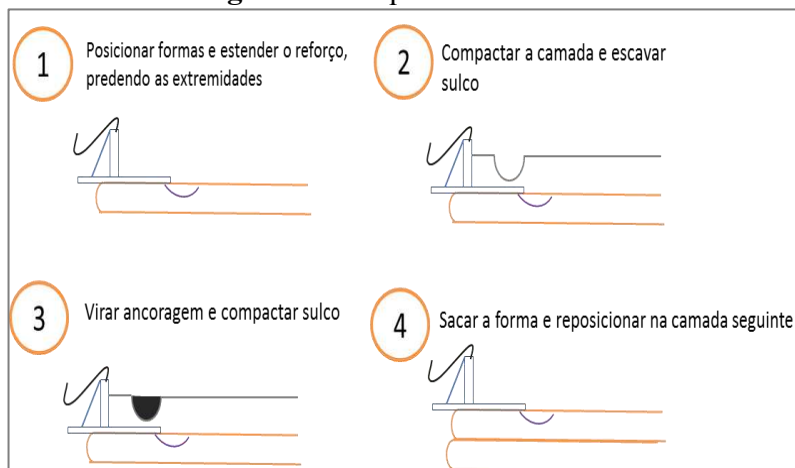
Figura 16: Seção transversal tipo para muro com sistema de autoenvolvimento com ancoragem superior



Fonte: (adaptado de Ehrlich e Becker, 2009)

Na Figura 17, apresenta-se o esquema construtivo do sistema autoenvolvidos.

Figura 17: Esquema construtivo



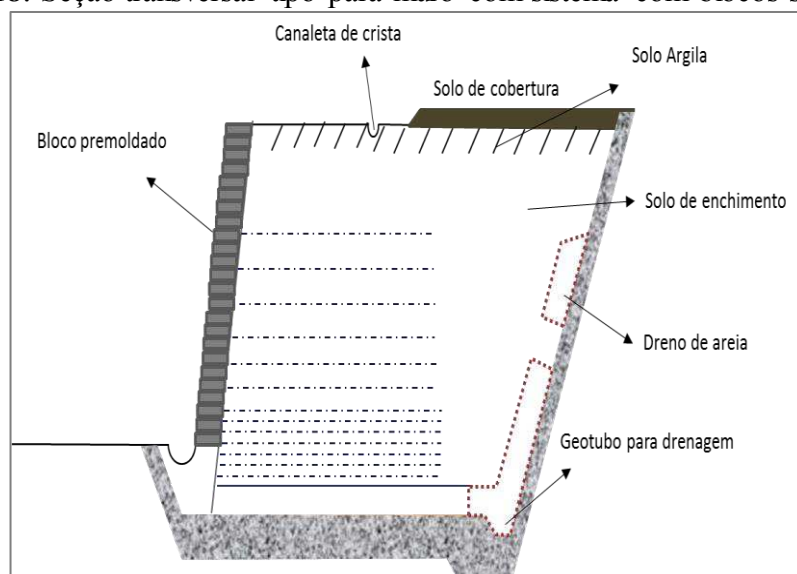
Fonte: (adaptado de Ehrlich e Becker, 2009)

b) Sistemas com blocos segmentais

Este sistema configura-se na utilização de componentes pré-fabricados e o mais interessante é que a composição destes elementos agregam duas funções simultâneas – usadas como fôrma lateral para compactação de camadas, como já corresponde ao faceamento definitivo da estrutura – a praticidade e facilidade de execução são outras características

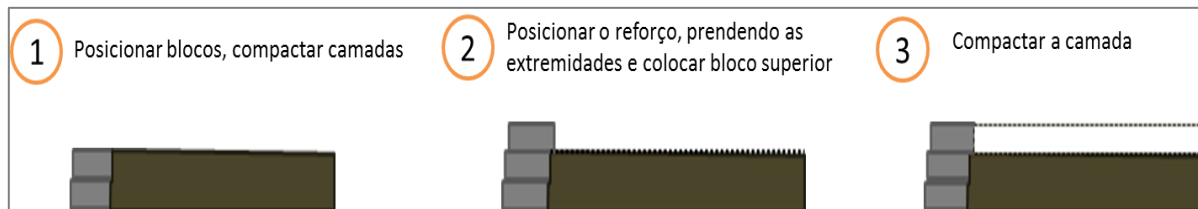
relevantes para logística da obra já que os blocos são leves e podem ser tratados de forma manual por um trabalhador. (Becker, 2009)

Figura 18: Seção transversal tipo para muro com sistema com blocos segmentais



Fonte: (adaptado de Ehrlich e Becker, 2009)

Figura 19: Esquema construtivo



Fonte: (adaptado de Ehrlich e Becker, 2009)

Vale ressaltar que apesar da eficiência de todas as técnicas mencionadas, a variância de custos e aspectos estéticos é de grande importância no momento de escolha do procedimento para uma obra, onde o projetista deverá escolher a técnica mais adequada para cada caso, realizando arranjos entre custo, função mecânica e arquitetônica da melhor forma possível.

Para os muros autoenvelopados é comum a utilização maior dos geotexteis, porém as geogrelhas podem ser utilizadas, desde que sejam aplicados com o sistema de fôrmas perdidas. A grande vantagem desse sistema é que se pode conseguir um custo menor, entretanto a questão estética pode deixar a desejar. Além do que, esse sistema apresenta baixa rigidez do faceamento, portanto possuem uma maior tolerância ao recalque. Enquanto os sistemas de blocos segmentados habitualmente apresentam o melhor acabamento estético,

tolerância razoável a recalques, além de um maior domínio dimensional, motivo pelo qual são os mais recomendados para os construtores sem experiência prévia em obras de solo reforçado (BECKER, 2009).

2.4.2 Arranjos dos Reforços

Em linhas gerais, Becker (2009) comenta sobre os arranjos dos reforços e afirma que o espaçamento entre reforços pode ser uniforme ou variável, e dependerá do sistema construtivo da contenção. Por exemplo, para muros autoenvelopados são recomendados espaçamentos uniformes por razões construtivas, apesar de que essa escolha acarreta maior consumo de geossintéticos. Ao passo que nos sistemas com blocos segmentados há uma melhor racionalização do sistema com espaçamento variável, porém, claramente, o espaçamento aplicado dependerá da continência dos blocos em neutralizar as pressões geradas pela compactação, sem ocorrência de algum problema após a execução. Logo, por via de regra, recomenda-se limitar o espaçamento vertical em 0,8 m, ainda na perspectiva do autor.

2.4.3 Sistemas de Drenagem

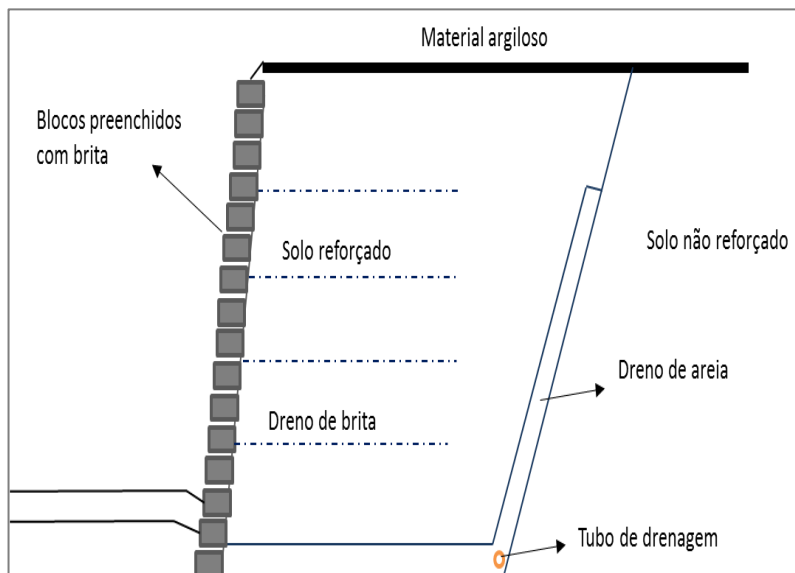
Segundo Ehrlich e Becker (2009), entre as hipóteses consideradas no sistema construtivo do muro de solo reforçado, a de poropressão nula está entre as mais relevantes para a estabilidade da estrutura. Logo, a drenagem assume um papel de suma importância, em especial em solos tropicais, que por serem compactados próximos a umidade ótima, a poropressão é considerada negativa pela saturação parcial, o que reflete em bons valores de sucção.

Quanto à presença de nível d'água na estrutura de solo reforçado, configura-se por ser uma situação extremamente negativa pelo motivo de contrariar as hipóteses anteriormente mencionadas, uma vez que a presença da mesma, provoca no solo o efeito de poropressão positiva, anulando imediatamente a hipótese de poropressão nula, assim como a sucção desejada, conjuntura esta que implica em uma redução da segurança da estrutura.

Diante do que fora comentado anteriormente, é indiscutível a importância de um sistema de drenagem adequado para cada situação. Portanto, Becker (2009) recomenda para resolução de problemáticas com esta, o emprego de um tipo colchão drenante com espessura especificada entre 20 e 50 cm, estruturado como uma espécie de capa por todo o maciço

reforçado e não reforçado, disposto sob o maciço reforçado e entre o maciço e a região não reforçada, conforme se apresenta na Figura 20.

Figura 20: Colchão drenante



Fonte: (Adaptado Ehrlich e Becker, 2009)

Além da preocupação quanto à drenagem das águas freáticas, é indispensável também a instalação de um sistema que atenda questões de intempéries do meio, como a erosão e infiltração devido à pluviosidade. Para isso são determinados e dimensionados os dispositivos drenantes apropriados para cada situação como canaletas longitudinais e transversais, dissipadores de energia, caixa coletoras etc.

2.4.4 Material de Enchimento

Por questões logísticas e de eficiência de uma obra, pode-se afirmar que a melhor fonte de retirada de solo é a que se encontra mais próxima da sua movimentação de terra. Ehrlich e Becker em sua obra “Muros e Taludes de Solo Reforçado – Projeto e Execução” (2009) comenta:

É aconselhado que em primeira análise seja mapeado a localidades onde ocorrerão taludes de cortes, escavações e de sondagem a trado. O primeiro contato com este solo deve ser feito por uma pessoa experiente onde deverão ser classificados de forma imediata pelos mesmos por meio de análise tátil-visual. Solos perceptivelmente inservíveis devem ser descartados instantaneamente.

Após a escolha adequada do solo e obtenção da quantidade desejada, é enviada uma amostra para o laboratório onde serão realizados todos os ensaios necessários para

caracterização do solo. A amostragem para o laboratório corresponde a 20 kg para solos finos ou 40 kg para solos mais grossos. (BECKER, 2009)

A determinação do solo para material de enchimento baseia-se basicamente na experiência local ou nos ensaios mecânicos que abrangem resultados de resistência e deformabilidade. Entre diversas classificações de solos desenvolvidas mundialmente, a que melhor atende solos tropicais é a MCT desenvolvida no Brasil por Nogami e Villibor. Nesse método, a identificação dos maciços ocorre após a compactação com a análise de suas propriedades, alinhada a um procedimento padronizado, além do ensaio de perda de massa por imersão. A classificação ocorre em duas classes que equivalem ao comportamento do solo, podendo ser laterítico ou não laterítico. (BECKER, 2009)

Logo, entende-se que o objetivo da classificação MCT é avaliar de forma técnica o comportamento do solo quanto à expansão, contração e permeabilidade, atribuindo desempenho para cada grupo de acordo com as propriedades mencionadas. A recomendação dada pelo autor anteriormente citado é de adequar todas essas características com o tipo de aplicação desejada seja para corpo de aterro, subleito, base de pavimento etc.

Quadro 2: Ensaios de caracterização dos solos

Ensaio	Normas Brasileiras
Limites de Atterberg	NBR 7180/84 – Determinação do limite de plasticidade NBR 6459/84 – Determinação do limite de liquidez
Granulometria	NBR 7181/84 Solo – Análise granulométrica NBR 13602/96 Solo – Avaliação da dispersabilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo - Ensaio de dispersão SCS
Massa específica dos grãos	NBR 6508/84 Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da massa específica
Umidade natural	NBR 6457/86 – Amostras do solo – Preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização DNER – ME 52/94 Solos e agregados miúdos – Determinação da umidade com emprego do Speedy DNER – ME 28/61 Método expedito de determinação do teor de umidade de solos pelo fogareiro DNER – ME 28/61 Determinação da umidade pelo método expedito do álcool
Proctor normal	NBR 7182/86 – Ensaio de compactação

Fonte: Adaptado Becker 2009

2.4.5 Roteiro de dimensionamento

Para melhor compreensão sobre o assunto será proposto a realização de um roteiro de dimensionamento de um solo reforçado com face em blocos intertravados de concreto e geogrelha, de acordo como Becker (2005).

a) Parâmetros iniciais: Nesta etapa serão levantadas todas as características do solo e do muro necessárias para realização do projeto como: geometria do muro, características do solo de enchimento, do solo de fundação, do bloco e reforço, até mesmo dos equipamentos a serem utilizados. Na tabela 1 são especificados todos estes parâmetros iniciais.

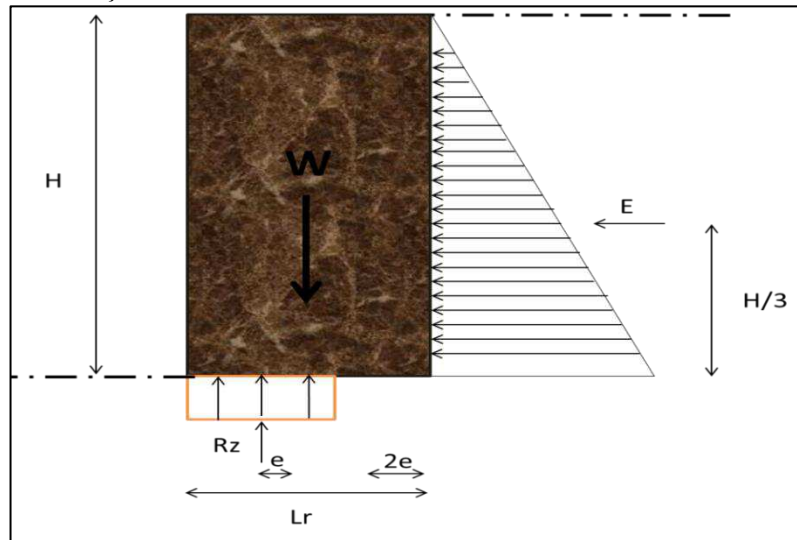
Tabela 1: Parâmetros do Solo e Muro

Geometria do muro	
Altura do Muro	H = 5,8m
Espaçamento dos reforços	Sv = 0,60 (constante)
Inclinação da face	1H:10V
Parâmetros do solo de enchimento:	
Descrição	Solo laterítico siltoargiloso, IP = 15%
Peso Específico	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
Ângulo de Atrito	$\phi = 35^\circ$
Intercepto Tangente Inicial	$c' = 10 \text{ kPa}$
Módulo expoente	$n = 0,78$
Parâmetros do Solo de Fundação	
Iguais do solo de Enchimento	
Parâmetros do bloco e reforço	
tipo de reforço	geogrelha de PVA
Eficiência do acoplamento	85%
Dimensões do bloco	40cm x 40 cm e altura de 20 cm
Características do rolo compactador	
Tipo de equipamento	rolo autopropelido Dynapac CA134PD
Tensão vertical induzida	110 kPa

Fonte: Adaptado Becker 2009

b) Análise de Estabilidade Externa: Como primeiro medida a fim de garantir a estabilidade externa deverá ser definido o comprimento dos reforços (L_r). A figura 21 apresenta as forças e variáveis nas análises. (os cálculos serão conduzidos considerando vertical a face do muro).

Figura 21: Forças e variáveis envolvidas nas análises de estabilidade externas



Fonte: Adaptado Becker 2009

- Cálculo do empuxo da zona não reforçada é dado (na ausência de ações de sobrecarga):

$$E = \frac{1}{2} * \gamma * H * Ka \text{ (Eq.1)}$$

O valor de Ka (coeficiente de empuxo ativo) pela formulação de Rankine:

$$Ka = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \text{ (Eq.2)}$$

Sendo $\phi = 35^\circ$, tem-se:

$$Ka = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{35^\circ}{2} \right) = 0,27$$

- Verificação do deslizamento: O fator de segurança ao deslizamento (FS) é determinado pela razão entre a máxima força resistente que pode ser mobilizada na base do muro e o empuxo de terra:

$$FS = \frac{\gamma * H * Lr * \tan\phi'}{\frac{\gamma}{2} * H^2 * Ka} \quad (Eq. 4)$$

Estabelecendo o fator de segurança mínimo de 1,5, o comprimento de reforço (Lr) para um muro sem ação de sobrecarga é dado por:

$$Lr \geq \frac{3}{4} * \frac{H * Ka}{\tan\phi'} \quad (Eq. 5)$$

Sendo H = 5,8 e Ka = 0,27, tem-se:

$$Lr \geq \frac{3}{4} * \frac{5,8 * 0,27}{\tan 35^\circ} = 1,68 \text{ m}$$

- Verificação do Tombamento: O fator de segurança ao tombamento (FS) é definido pela razão entre os momentos estabilizantes proporcionados pelo peso do muro e o momento estabilizante gerado pelo empuxo horizontal de solo (E).

$$FS = 3 * \frac{Lr^2}{Ka * H^2} \quad (Eq. 6)$$

Estabelecendo o fator de segurança mínimo de 2,0, o comprimento de reforço (Lr) para um muro sem ação de sobrecarga é dado por:

$$Lr \geq \sqrt{\left(\frac{2}{3} * Ka * H^2\right)} \quad (Eq. 7)$$

Sendo H = 5,8 e Ka = 0,27, tem-se:

$$Lr \geq \sqrt{\left(\frac{2}{3} * 0,27 * 5,8^2\right)} = 2,47 \text{ m}$$

- Verificação das tensões base: A resultante das tensões base do muro deve garantir toda a base comprimida e, para tanto, a excentricidade (e) deve ser inferior à sexta parte de Lr.

A excentricidade da resultante normal das forças que atuam na base do muro (e) pode ser expressa como:

$$e = \frac{E * \frac{H}{3}}{Rz} = \frac{\frac{1}{2} * \gamma * H^2 * Ka * \frac{H}{3}}{\gamma * H * Lr} = \frac{Ka * H^2}{6 * Lr} \quad (\text{Eq. 8})$$

Para que a condição de base totalmente comprimida seja atendida, tem-se:

$$e = \frac{Ka * H^2}{6 * Lr} \geq \frac{Lr}{6} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$Lr = H * \sqrt{Ka} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$Lr \geq 5,8 * \tan\left(45^\circ - \frac{35^\circ}{2}\right) = 3,02 \text{ m}$$

Portanto, pode-se chegar à conclusão que o comprimento mínimo necessário dos reforços que possa atender simultaneamente os requisitos de segurança (FS) contra o deslizamento, tombamento e ainda manter base do muro comprimida será de 3,02 m.

- Capacidade de carga do terreno de fundação: Para continuidade do dimensionamento, será adotado a priori um comprimento de 0,8H que corresponde a 4,6 m para os reforços. Esta medida é feita para evitar o arrancamento da zona resistente.

$$\sigma_{z,b} = \frac{Rz}{Lr - 2e} = \frac{\gamma * H * Lr}{Lr - 2 * \frac{Ka * H^2}{6 * Lr}} = \frac{\gamma * H}{1 - \frac{Ka}{3} * \left(\frac{H}{Lr}\right)^2} \quad (\text{Eq. 11})$$

Adotando parâmetros já determinados, a tensão base será:

$$\sigma_{z,b} = \frac{18 * 5,8}{1 - \frac{0,27}{3} * \left(\frac{5,8}{4,6}\right)^2} = 121,9 \text{ kN/m}^2$$

Estabelecido o fator de segurança 2,5 para capacidade de carga da fundação, o terreno deve apresentar uma tensão última superior a 305 kPa.

Segundo Brinch Hansen (1961) E Sokolovski (1960), a capacidade de carga do terreno é dada por:

$$q_{lim} = \gamma * D + c * N_c * f_{ci} + \gamma * D * (N_q - 1) * f_{qi} + \left(\frac{1}{2} * \gamma * B' * N_\gamma * f_{yi}\right) \text{ (Eq. 12)}$$

Os fatores de inclinação e excentricidade são:

$$f_{qi} = \left[1 - \frac{R_h}{R_v + B' * c' * \cotan(\phi)}\right]^2 \text{ (Eq. 13)}$$

$$f_{ci} = f_{qi} - \frac{1 - f_{qi}}{N_c * \tan(\phi)} \text{ (Eq. 14)}$$

$$f_{yi} = (f_{ci})^{3/2} \text{ (Eq. 15)}$$

Sendo que R_v e R_h são as resultantes das solicitações horizontais e verticais, respectivamente.

Admitida a resultante vertical igual ao peso da massa de solo reforçada e a resultante horizontal igual ao empuxo ativo, tem-se:

$$f_{qi} = \left[1 - \frac{82,00}{480,2 + 3,94 * 10 * \cotan(35^\circ)}\right]^2 = 0,718$$

$$f_{ci} = 0,718 - \frac{1 - 0,718}{46,1 * \tan(35^\circ)} = 0,709$$

$$f_{yi} = (0,718)^{\frac{3}{2}} = 0,608$$

A tabela 2 apresenta valores de fatores de capacidade de carga para fundações superficiais corridas, de acordo com Prandtl (1921), Reissner (1924) e Vesic (1975).

Tabela 2: Fatores de capacidade de carga

Ângulo de atrito efetivo (°)	Nc	Nq	Ny
0	5,14	1	0
15	10,98	3,94	2,65
20	14,83	6,4	5,39
25	20,72	10,66	10,88
30	30,14	18,4	22,4
35	46,12	33,3	48,03
40	75,31	64,2	109,41
45	133,9	134,9	271,76

Fonte: Adaptado Becker 2009

Considerando a priori embutimento de 0,4 m e utilizando a tabela acima, a capacidade de carga do solo de fundação será:

$$q_{lim} = 18 * 0,4 + 10 * 46,12 * 0,709 + 18 * 0,4 * (33,3 - 1) * 0,718 + \left(\frac{1}{2} * 18 * 3,94 * 48,03 * 0,608\right) = 1536 \text{ kPa}$$

$$FS = \frac{q_{lim}}{\sigma'_{z,b}} = \frac{1536}{121,9} = 12,6$$

(O fator de segurança elevado que foi obtido é consequência dos elevados parâmetros adotados para o solo de fundação)

c) Análise de Estabilidade Interna: Os reforços devem ser definidos de forma a evitar a ruptura por tração ou o arrancamento da zona resistente. O comprimento, a resistência e a quantidade de reforços a serem estabelecidos são determinados com base na tensão máxima atuante nos reforços $T_{máx}$.

- Determinar a tensão vertical induzida pela compactação: Para o rolo compactador utilizado, a tensão vertical induzida para rolo compactador é de 110kPa.

- Determinar a tensão vertical geostática no nível do reforço: Considera-se que cada reforço situa-se a uma profundidade genérica z .

$$\sigma'z = \frac{\gamma' * z}{1 - \left(\frac{Ka}{3}\right) * \left(\frac{z}{Lr}\right)^2} = \frac{18 * z}{1 - 0,0043 * z^2} \text{ (Eq.16)}$$

- Determinar $\sigma'zc$: De forma geral, a determinação desta tensão é formulada partir das seguintes relações.

Para: $\sigma'z < \sigma'zc$ tem-se $\sigma'zc = 1110 \text{ kPa}$

Para: $\sigma'z > \sigma'zc$ tem-se $\sigma'zc = \sigma'z$

- Determinar β : Para se realizar a primeira interação, deve-se adotar um valor adequado de Si , de acordo com o tipo de reforço. No caso desta simulação, será considerado $Si = 0,03$ (geogrelha PVA).

$$\beta = \frac{\left(\frac{\sigma}{Pa}\right)^n}{Si} \text{ (Eq. 17)}$$

Para primeira interação:

$$\beta = \frac{\left(\frac{\sigma}{101,3}\right)^{0,78}}{0,03} = 0,92 * (\sigma'zc)^{0,78}$$

Para as demais interações:

$$\beta = \frac{\left[\left(\frac{\sigma}{101,3}\right)^{0,78}\right]}{Si}$$

Onde:

$$Si = \frac{Jr}{k * Pa * Sv} = \frac{Jr}{128 * 101,3 * 0,6} = \frac{Jr}{7781} \text{ (Eq.18)}$$

- Determinar $T_{\text{máx}}$: A força de tração máxima ($T_{\text{máx}}$) é determinada para cada nível de reforço, considerando os valores de β , $\sigma'z$ e $\sigma'zc$ a partir dos ábacos em anexo

neste trabalho. A partir do valor arbitrário de β , tem-se a primeira interação representada na tabela 3.

Tabela 3: Primeira interação por β

Camada de reforço	Sv (m)	Cota (m)	Lr (m)	Si (kPa)	σ_z (kPa)	σ_{zc}	σ_z/σ_{zc}	β	X (ábaco)	T _{máx}
10	0,7	5,4	4,6	0,03	7,2	110	0,07	35,5	0,14	11,01
9	0,6	4,8	4,6	0,03	18,1	110	0,16	35,5	0,15	9,52
8	0,6	4,2	4,6	0,03	29,1	110	0,26	35,5	0,15	9,61
7	0,6	3,6	4,6	0,03	40,4	110	0,37	35,5	0,15	9,69
6	0,6	3	4,6	0,03	52,1	110	0,47	35,5	0,15	9,77
5	0,6	2,4	4,6	0,03	64,4	110	0,59	35,5	0,15	9,86
4	0,6	1,8	4,6	0,03	77,3	110	0,7	35,5	0,15	9,94
3	0,6	1,2	4,6	0,03	91	110	0,83	35,5	0,15	10,03
2	0,6	0,6	4,6	0,03	105,8	110	0,96	35,5	0,15	10,11
1	0,3	0	4,6	0,03	121,9	110	1	35,5	0,15	5,65

Fonte: Adaptado Becker 2009

- Determinar as características dos reforços: É possível após esta primeira interação com base nos valores de T_{máx} obtidos estabelecer as características adequadas dos reforços, considerando os fatores de segurança e as resistências de cálculo para ruptura e para o arrancamento que serão demonstradas logo adiante.
- Refinamento do cálculo: Esta etapa do dimensionamento consiste na realização de uma segunda interação, caso o valor de Si correspondente ao reforço escolhido seja diferente do valor arbitrado na primeira interação. Esta segunda interação levarão a um novo valor de T_{máx} por meio de novos valores de Si e consequentemente de β .

Tabela 4: Segunda interação por β

Camada de reforço	Sv (m)	Altura (m)	Jr (kN/m)	Lr (m)	Si	σ_z (kPa)	σ_{zc} (kPa)	β	X (ábaco)	T _{máx}
10	0,7	5,4	700	4,6	0,077	110	0,07	13,8	0,15	11,7
9	0,6	4,8	700	4,6	0,09	110	0,16	11,9	0,16	10,41
8	0,6	4,2	700	4,6	0,09	110	0,26	11,9	0,16	10,69
7	0,6	3,6	700	4,6	0,09	110	0,37	11,9	0,17	11,07
6	0,6	3	700	4,6	0,09	110	0,47	11,9	0,17	11,46
5	0,6	2,4	700	4,6	0,09	110	0,59	11,9	0,18	11,84
4	0,6	1,8	700	4,6	0,09	110	0,7	11,9	0,19	12,22
3	0,6	1,2	700	4,6	0,09	110	0,83	11,9	0,19	12,6
2	0,6	0,6	700	4,6	0,09	110	0,96	11,9	0,2	13,17
1	0,3	0	700	4,6	0,18	110	1	6,4	0,22	7,93

Fonte: Adaptado Becker 2009

Conclui-se que neste dimensionamento foram necessárias apenas duas interações.

- Resistência admissível do reforço: Com respeito à ruptura dos reforços é estabelecido um fator de segurança mínimo de 1,5. O Td mínimo para geogrelha é de 19,8 kN/m (13,70kN/m x 1,5). Logo, o reforço selecionado pode ser utilizado, pois tem Td = 20 kN/m.
- Estabilidade ao arrancamento: Deve-se determinar o comprimento de embutimento disponível além da cunha ativa (Le), dependente da profundidade de cada reforço.

$$Le = Lr - (H - z) * [\tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) - \frac{1}{\tan \omega}] = 4,6 - 0,42(5,8 - z) \text{ (Eq. 19)}$$

A resistência ao arrancamento (Pr) pode ser determinada com base nas características do contato solo-reforço e das tensões geostáticas verticais atuantes em cada reforço.

$$Pr = 2F * \alpha * \sigma * Le \geq FS * \tau_{max} \text{ (Eq. 20)}$$

(O fator de efeito de escala (α) será admitido como 1,00)

$$F' = fa * \tan\phi = 0,8 * \tan 35 = 0,56$$

Portanto:

$$Pr = 2 * 0,56 * 1,0 * \sigma * [(4,6 - 0,42(5,8 - z)]$$

$$FS = \frac{Pr}{\tau_{\max}} \text{ (Eq. 21)}$$

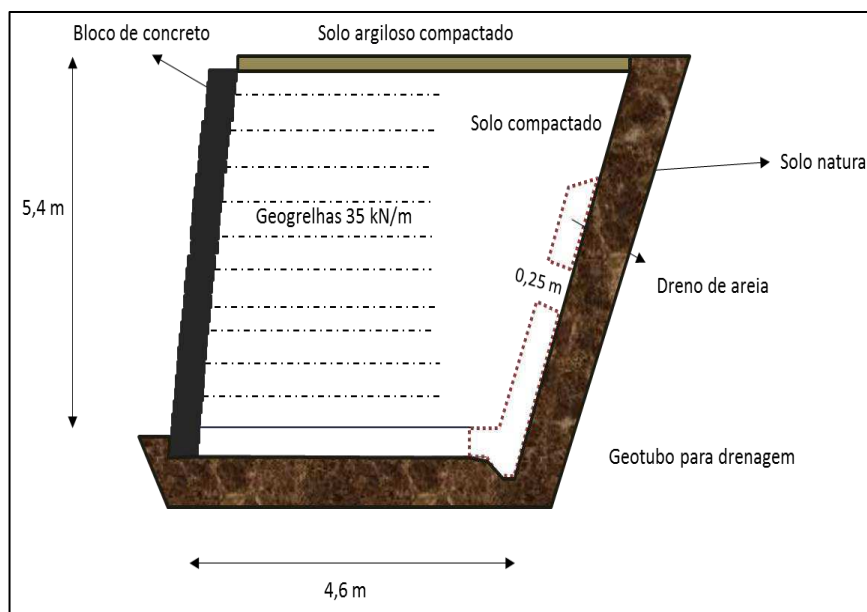
Tabela 5: Fatores de segurança com respeito ao arrancamento

Camada de reforço	Prof.	Le (m)	Pr (kN/m)	T _{máx} (kN/m)	F.S
10	0,4	2,33	18,8	11,7	1,6
9	1	2,58	52,28	10,41	5
8	1,6	2,83	92,44	10,69	8,6
7	2,2	3,09	139,8	11,07	12,6
6	2,8	3,34	195,02	11,46	17
5	3,4	3,59	258,97	11,84	21,9
4	4	3,84	332,71	12,22	27,2
3	4,6	4,1	417,62	12,6	33,2
2	5,2	4,35	515,4	13,17	39,2
1	5,8	4,6	628,25	7,93	79,2

Fonte: Adaptado Becker 2009

A conclusão que pode-se chegar diante da tabela 5 é que para todos os níveis dos reforços, o fator de segurança mínimo de 1,5 foi atendido. Enquanto o arranjo final da estrutura pode ser observado na Fig.22.

Figura 22: Arranjo final a da estrutura de Solo Reforçado com Geogrelha



Fonte: Adaptado Becker 2009

2.5 Bioengenharia dos solos

Conceitualmente, a bioengenharia dos solos é o arranjo dinâmico entre matérias vivas oriundas da natureza aliadas a procedimentos técnicos de engenharia com o objetivo de aliviar problemas ambientais, assim como reforçar estruturalmente. Ao contrário de outras tecnologias em que as plantas são, primordialmente, um elemento estético do projeto, na bioengenharia dos solos, a vegetação atua como uma importante componente estrutural (LEWIS, 2000, p.1).

A descoberta deste método não é tão contemporânea quanto a preocupação mundial em relação aos impactos ambientais por meio de grandes obras. Logo, a Bioengenharia dos Solos não surgiu para tentar enradicar os desvios ambientais, pois há muito tempo o homem percebeu o potencial da vegetação para minimização da erosão em superfícies. Existem publicações de 1792 citando o uso de bioengenharia dos solos, decrevendo procedimentos com arbustos e gramíneas para combater a erosão, atuando como cobertura contra ação dos ventos e águas da chuva, ajudando na estabilização de margens ribeirinhas (LEWIS, 2000, p.1).

Figura 23: Europa em 1900 com trabalhadores utilizando vegetação para aplicação de técnicas bioengenharia de solos



Fonte: (Finney, 1993 apud LEWIS,2000).

Autêntico pioneiro do conservacionismo do solo e da água, pode-se afirmar que a Engenharia Natural moderna surgiu em 1874 com os trabalhos de Wollney. Trata-se de um alemão que preparou as primeiras análises empíricas de conservação do solo e da água, porém teve seu trabalho apenas reconhecido em 1938 por Baver (USA). (LUCENA; 2012)

No Brasil, o processo inicial em prol do desenvolvimento de leis ambientais somente aconteceu por meio da elaboração do código a respeito da proteção da água, chamado de Código das Águas (Decreto 24.643 de 10/07/34), para posteriormente estabelecer normas de proteção ao solo com o Estatuto da Terra (lei 45504 de 1964) e o Código Florestal (lei 4771 de 1965). Sobre a proteção superficial do solo, foi pioneiro o DNER ao estabelecer normas para a proteção de taludes rodoviários que representou um grande avanço no início dos anos 70.

Destaque-se também o DNIT que divulgou em 2006 suas normas 071 a 077, que pela primeira vez menciona a bioengenharia de solos em um documento de instituição governamental no Brasil, abrindo caminho para futura normatização das práticas relacionadas à proteção e reforço do solo. (LUCENA; 2012)

A erosão é um dos principais processos responsáveis pela esculturação do relevo terrestre, sendo então um fenômeno natural, desde que ocorra em pequenas proporções. O problema está na forma de tratamentos desses processos que começam, em geral, em áreas pequenas e se expandem subitamente de forma desordenada, tornando necessário o desenvolvimento de soluções de Engenharia para conter este mecanismo. Logo, é de extrema importância a aplicação de técnicas enquanto a situação pode ser resolvida da melhor

maneira, com uma economia significativa em termos financeiros, além de minimizar de forma satisfatória os impactos no local e em áreas adjacentes.

A necessidade da produção de trabalhos que analisem a complexidade desse tema com o reconhecimento de suas causas e fatores deliberativos são de extrema importância diante do avanço notório dos impactos ambientais desenvolvidos em muitas das vezes de forma silenciosa nos centros das cidades e em suas margens, também para evitar possíveis proporções catastróficas.

Obras onde são aplicadas técnicas de bioengenharia de solos geralmente não exigem muito o uso de equipamentos pesados nos seus procedimentos, implicando em menos gastos na execução e minimização acentuada dos impactos ao meio ambiente. A oportunidade de usufruir da vegetação local é outro fator que agregaria ganhos para o projeto, pois a preocupação estaria limitada ao trabalho de colhimento, manuseio e transporte. Outro ponto positivo quanto essa questão é a própria adaptação das espécies adquiridas no local alinhada ao clima e condições do solo (ERB, 1985)

Décadas de pesquisa e monitoramento de áreas onde foram tratadas com métodos de bioengenharia de solos apontam um elevado desempenho inicial, além da sua capacidade estrutural aumentar com o tempo e de acordo com a estabilização da vegetação. A composição de raízes quando espécies vegetais estão estabelecidas reforçam o maciço de terra e ao mesmo tempo retira o excesso de umidade do solo, o que contribui bastante para obtenção de uma solução ideal, possível ponte para a estabilidade a longo prazo (LEWIS, 200, p.3).

Entre as variáveis positivas no uso da vegetação como ferramenta no método estudado tem-se a diminuição do volume de água que alcança o solo, provocada pela interceptação da chuva por parte da folhagem. O aumento da interação do conjunto solo-raiz gera um aumento significativo do coeficiente de segurança do talude, além de um acréscimo substancial à resistência ao cisalhamento da estrutura.

Tratando a vegetação como elemento vivo e dinâmico não se pode atribuir a ela comportamentos pré-definidos, pois seu comportamento depende de vários fatores e na falta ou excesso de algum, pode gerar efeitos indesejáveis, negativos. Portanto, ao mesmo tempo em que a vegetação auxilia na estabilidade de taludes e no controle de erosão, ela gera efeitos negativos.

Segundo Pereira (2006, p.8) a alta redução da umidade do solo causada pela necessidade de algumas espécies de grande consumo de água podem causar trincas e aberturas, em especial em solos expansivos. O autor ainda menciona sobre os efeitos das raízes que quando aplicadas em desacordo com determinada situação pode contribuir para

deterioração de estruturas cimentadas superficialmente, como para desagregação dos solos quando muito concentradas e surgimento de sulcamentos e ravinas.

Sendo assim, serão citados os principais efeitos da vegetação na estabilidade dos solos que devem ser considerados e tecnicamente analisados por sua possível influência negativa sobre a estabilidade e sua interação com os demais efeitos ora potencializando ou anulando sua ação de acordo com Lucena (2012).

2.5.1 Fatores de elaboração de projeto

Primeiramente, o reconhecimento do tipo de solo do talude, é fundamental, pois é a natureza do maciço que oferece o suporte necessário e que determina características fundamentais em um projeto de recuperação.

Portanto, para o desenvolvimento de um projeto de bioengenharia de solos, a análise não se limita a avaliação e medição do local. O engenheiro de projeto deve atentar-se ao histórico natural e evolução, do mesmo modo que o uso social e cultural da área ao redor do projeto, pois todos estes são variantes que influenciam a escolha dos tipos de soluções que podem ser utilizadas de acordo com o tipo de solo.

Além dos fatores já mencionados, há outras variantes básicas que devem ser consideradas para um projeto de bioengenharia dos solos, os quais estão representados no quadro 3:

Quadro 3: Fatores determinantes de projeto

Variantes Básicas para elaboração de Projeto de Engenharia Natural		
Fatores	Tipos	Observações
Climáticos	De precipitação, níveis e duração; temperaturas	Dados extremos de temperatura são considerados
Topográficos	Declividade dos taludes	O variação climática nas áreas próximas do terreno podem afetar nos níveis de erosão e no desenvolvimento da vegetação
	Estrutura do terreno	
	Elevação da área de projeto e direção solar	
Tipologia de Solo	Substrato subjacente	Determinantes para o conhecimento de capacidade de exploração da umidade e nutrientes disponíveis
	Permeabilidade das raízes	
	Permeabilidade da água	
Água	Existência de dispositivos de drenagem na área do projeto	Se tratando de córregos, preocupação se encontra em espécies de peixes que poderiam ser afetados pela erosão
	Mapeamento de áreas com água potável	
	Locação de canais naturais de drenagem	
	Áreas de escoamento superficial do pavimento	
Vegetação	Tipos de plantas com identificação das espécies que mais crescem nas áreas de projeto e áreas próximas	Indispensável para identificação das espécies colonizadoras
Processos de erosão	Tipo de massa gerada pela erosão	A tendência refere-se a dinâmica da erosão do talude, se há possibilidade em recuperar-se de forma natural, se permanecerá uniforme ou piorar
	Origem	
	Tendência de recuperação do terreno	

Fonte: Adaptado Pereira 2006

Segundo Lucena (2012), “o único efeito que não tem contra indicações é o aumento da coesão dos solos pelas raízes o que leva ao aumento da resistência ao cisalhamento do solo.” Complementando, Pereira (2006) afirma que “a escolha adequada das espécies e suas respectivas quantidades é fator decisivo no estabelecimento da vegetação e proteção contra processos erosivos”. Diante disso, o autor faz entender a real importância sobre a seleção vegetal, onde o entendimento da escolha das sementes, o efeito das raízes e o efeito hidrológico são primordiais para o sucesso do projeto.

O fator climático é classificado pelo mesmo autor citado anteriormente, como o de maior relevância para escolha adequada das sementes já que condições climáticas não podem ser simuladas com caráter de realidade, ou seja, reproduzidas artificialmente. Outros fatores citados por Pereira (2006) correspondem à adaptação das espécies as condições do local onde será realizada a recuperação ambiental (Edáficos) e as variantes ambientais pautadas em função da velocidade e segurança da recuperação ambiental.

Um aspecto muito interessante desenvolvido por Pereira (2016), é a interação feita entre as quantidades de sementes e o fator de segurança associado às condições adversas no local, representado no quadro 4. Este índice tem por objetivo corrigir situações onde nem todas as sementes terão o desempenho esperado, sendo acrescidas as quantidades de sementes que serão plantadas.

Quadro 4: Fator de segurança associado à condições adversas

ITEM	VARIÁVEL	Fator de Segurança (FS)				
		1	1,25	1,5	1,75	2
1	Inclinação da área	Plano	até 30°	30° - 45°	45° - 60°	>60°
2	Tipo de material	Solo	Areno/siltoso	Estéril	Pedregoso	Material Solto
3	Preparo do solo	Excelente	Razoável	Curva de Nível	Irregular	Sem preparo
4	Técnica de Proteção	Biomantas reforçadas	Biomantas Simples	Hidro/mulching	Hidrossemeio	Semeio manual
5	Altura de Talude	Até 5,00	5 até 8	8 até 15	15 até 30	>30
6	Drenagem	Sistema OK	Cristas e Bermas	Cristas	Bermas	Inexistente
7	Época do Plantio	out-nov-dez	jan-fev-mar	abr-mai-jun	jun-jul-ago	maio-jun-jul

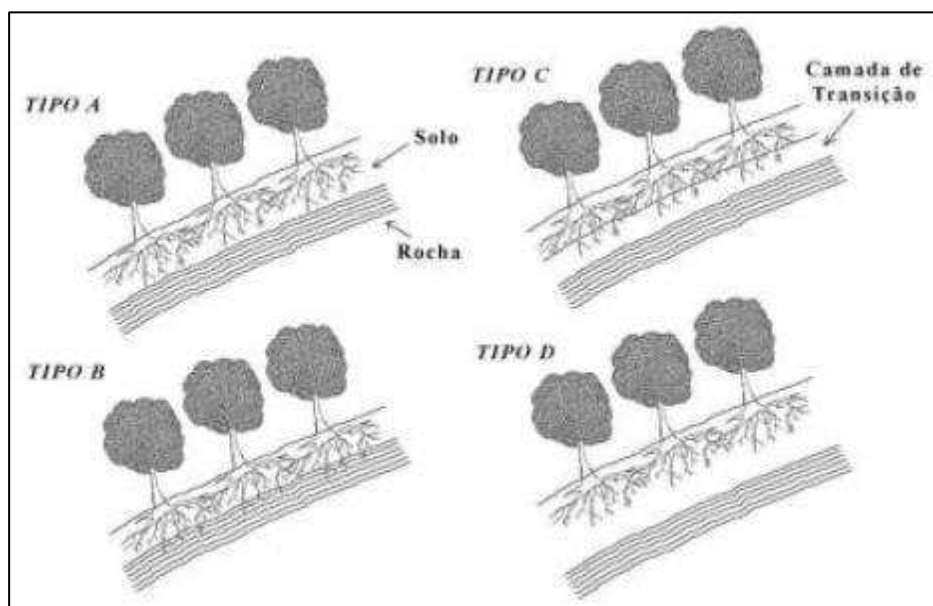
Fonte: Adaptado Pereira 2016

Quanto às raízes e seus efeitos na vegetação, pode-se citar quatro funções principais de acordo com Marshland (1996 apud PINTO, 2009, p 24): base e ancoragem de estabilidade; armazenamento de água e de minerais dissolvidos; absorção de água e de

minerais dissolvidos; condução da água e de minerais dissolvidos para os brotos e deles para baixo novamente.

Diante da limitação da influência das raízes determinada pela diminuição da quantidade das raízes na proporção da maior profundidade do subsolo, há a diminuição do efeito de coesão, este garantido de forma satisfatória para níveis menores que 1,50 da superfície. (GRAY, 1995 apud PINTO; 2009).

Figura 24: Tipos de reforços de taludes por raízes



Fonte: (Gray, 1995 apud LEMES, 2001, p. 68).

Segundo Lemes (2001, p. 68-69), a figura 24 representa os principais tipos de reforços dado pelas raízes e as possibilidades de desenvolvimento em cada situação. No tipo A, por exemplo, mostra que as raízes atendem completamente a camada de solo, todavia não chega a atingir a rocha, sendo nesse caso atribuída uma fragilidade. Enquanto no tipo B, as raízes penetram nas fissuras da rocha ancorando assim de forma satisfatória o solo. No caso C, trata-se de uma situação onde as raízes atingem uma camada de transição a resistência ao cisalhamento, assim como a densidade aumentam com a profundidade. Por ultimo, tipo D, em que as raízes não atingiram um nível de camada de solo suficiente para um reforço mecânico para a estabilidade do talude.

Quanto ao efeito hidrológico, as influências destes mecanismos podem ser benéficas ou adversas. Interferências estas que é representada de vários modos como: a forma como a água chega ao solo, como ela entra e como é expelida do solo. LEMES (2001, p.33)

cita os principais efeitos hidrológicos que acontecem e sua consequência na interação com o solo, estes representados no quadro 5.

Quadro 5: Principais efeitos hidrológicos

EFEITO HIDROLÓGICO	Influência
Interceptação das chuvas pelas folhas, resulta em	
Absorção e evaporação reduzindo água disponível para a infiltração	Benéfico
redução da energia das gotas de chuva e consequentemente da erosão	Benéfico
Aumento no tamanho das gotas que caem, aumentando assim a chuva localizada	Adverso
Caules e folhas interagindo com o fluxo de superfície, resulta em	
Maior armazenamento e maior volume de água armazenada	Adverso/ Benéfico
Grande irregularidade no fluxo da água, reduzindo a sua velocidade	Benéfico
Raízes provocam no solo	
Aberturas na superfície permitindo a infiltração	Adverso
Retirada da umidade, qual é perdida na atmosfera por transpiração	Benéfico
Redução da poro-pressão e aumento da sucção e consequentemente da resistência do solo	Benéfico
Aumento da quantidade de canalículos no solo, resultando em aumento da permeabilidade	Adverso

Fonte: Adaptado Lemes 2001, p. 33

3 METODOLOGIA

3.1 Método de pesquisa

O método é, segundo Oliveira (2002, p. 57), “Uma forma de pensar para se chegar à natureza de um determinado problema, quer seja para estudá-lo, quer seja para explicá-lo”. Enquanto a pesquisa é de acordo com Andrade (2001, p.121), “[...] o conjunto de procedimentos sistemáticos, baseado no raciocínio lógico, que tem por objetivo encontrar soluções para problemas propostos, mediante a utilização de métodos científicos”. Logo, pode-se reconhecer como atividade preeminente da metodologia a pesquisa.

Segundo Gil (2007, p. 17), pesquisa é determinada como o:

(...) procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos. A pesquisa desenvolve-se por um processo constituído de várias fases, desde a formulação do problema até a apresentação e discussão dos resultados.

Gerhardt e Souza (2009, p.13 apud MINAYO, 2007, p. 44) destacam a relevância da diferenciação entre metodologia e método:

É importante salientar a diferença entre metodologia e métodos. A metodologia se interessa pela validade do caminho escolhido para se chegar ao fim proposto pela pesquisa; portanto, não deve ser confundida com o conteúdo (teoria) nem com os procedimentos (métodos e técnicas). Dessa forma, a metodologia vai além da descrição dos procedimentos (métodos e técnicas a serem utilizados na pesquisa), indicando a escolha teórica realizada pelo pesquisador para abordar o objeto de estudo. No entanto, embora não sejam a mesma coisa, teoria e método são dois termos inseparáveis, “devendo ser tratados de maneira integrada e apropriada quando se escolhe um tema, um objeto, ou um problema de investigação.

Quanto aos tipos de pesquisa, estas podem ser classificadas quanto aos seus objetivos, e são citados a seguir:

- a) Pesquisa exploratória;
- b) Pesquisa descritiva;
- c) Pesquisa explicativa.

Para agregar maior valor a este projeto, utilizou-se como técnica para coleta de dados as seguintes ferramentas: a pesquisa bibliográfica, o estudo de caso análise histórica e documental.

A pesquisa exploratória é utilizada quando o tema a ser trabalhado é pouco explorado e investigador necessita absorver traços inéditos e colher novos questionamentos. Ela é realizada por meio de pesquisas bibliográficas, questionários, pesquisa documental sobre a tese estudada. (REIS, 2008).

Quanto à pesquisa descritiva, a preocupação encontra-se em descrever as características da realidade que norteia o tema escolhido, seus fenômenos. Possui como objetivo principal a discriminação das características de determinado público ou evento ou fixação de associação entre variáveis. (GIL, 1999).

A pesquisa explicativa resume-se em esclarecer de forma objetiva os motivos ou os porquês das coisas por meio das respostas obtidas. São exemplos deste tipo de pesquisa os trabalhos do tipo: pesquisa experimental, estudo de caso controle.

3.2 Classificação do tipo de pesquisa

Para o melhor desenvolvimento deste trabalho e melhor exploração desta pesquisa, observou-se que ela é classificada da seguinte maneira:

- a) Exploratória
- b) Descritiva

A pesquisa exploratória é notada a partir da realização da pesquisa bibliográfica, onde Gil (1999, p.65), por sua vez, afirma que: “a pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos”. Portanto, é assim classificada na etapa em que se fez a utilização de obras já publicadas: livros, artigos científicos, revistas, documentos eletrônicos na investigação e concepção de conhecimento sobre estabilidade e recuperação de taludes e todas as problemáticas que a cercam.

Quanto à pesquisa descritiva, ela é categorizada a partir da elaboração do estudo de caso, pois seu objetivo é obter o maior número de dados, informações, características mais detalhadas possíveis para enriquecer a realização do trabalho e ter a possibilidade de dispor uma proposta de solução que atenda de forma satisfatória resolução do problema inicial.

Ainda sobre o estudo de caso, Reis (2008, p.54) o discrimina como:

O estudo de caso é uma técnica de pesquisa com base empírica. Consiste em selecionar um objeto de pesquisa, que pode ser um fato ou um fenômeno estudado nos seus vários aspectos. Nesse tipo de pesquisa o pesquisador e o participante representante da situação-problema cooperam mutuamente com o estudo.

O objetivo principal deste estudo de caso foi perceber e estudar de maneira focada a problemática que acerca os taludes implantados em obras rodoviárias e ferroviárias em relação a sua recuperação tanto ambientais como estrutural utilizando técnicas naturais.

3.3 Coleta de dados

Quanto à classificação, as origens para a coleta de dados podem ser primárias e secundárias. A primeira se referencia dados que ainda não sofreram estudo e análise. Este tipo de coleta é materializado por meio de técnicas como: entrevistas, formulários, questionários. Já os classificados como secundários corresponde a dados que já se encontram disponíveis por terem sido anteriormente objeto de estudo e análise.

Portanto, para realização desta pesquisa utilizou-se apenas fontes secundárias, devido à realização de busca e coleta de informações bibliográficas ponderadas no tema como agente de estudo.

Qualquer pesquisa implica o levantamento de dados de variadas fontes. Quando o levantamento ocorre no próprio local onde os fenômenos acontecem, temos uma documentação direta (por exemplo, na entrevista). E, quando o pesquisador procura o levantamento que outros já fizeram temos documentação indireta. A documentação indireta por sua vez pode ser encontrada nas fontes primárias, ou na bibliografia. No primeiro caso, a pesquisa é documental; no segundo, bibliográfica. (RAMPAZZO, 2005).

Assim sendo, neste projeto entende-se como fonte secundária o acervo documental do local obtido aplicados juntamente com as vistorias técnicas realizadas durante a composição deste trabalho, com o acompanhamento de responsáveis técnicos que elucidaram com bastante eficácia a problemática em questão como também registros fotográficos para que o trabalho demonstrasse de forma clara a realidade encontrada no talude de estudo.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Histórico do trecho

A área em estudo é um aterro de uma plataforma ferroviária situado no Km 4 + 800 (Ver Fig. 25) de uma estrada de ferro de carga pesada. Os dados de campo para descrição e diagnóstico da situação deste trecho foram obtidos através de inspeções de campo, levantamento topográfico e sondagens (feitos por terceiros, não foi possível seu acompanhamento). Os dados foram obtidos por meio do Relatório Técnico do Projeto Ferroviário de Expansão de uma ferrovia nordestina de carga pesada.

A região em questão está localizada na extremidade ocidental do Nordeste do Brasil e corresponde a uma área de transição entre o clima nordestino e o da região amazônica, possuindo coberturas vegetais que variam de florestas tropicais a caatingas e cerrados, cortadas por uma rede de rios perenes e seus afluentes que oferecem uma equilibrada e rica hidrografia. Situando-se mais precisamente nas adjacências do perímetro urbano da cidade de São Luís - MA e é acessada através da rodovia BR-135 (trabalho não publicado).

A problemática da região está em primeira instância pelo contexto atual constatado: aterro em material arenoso. Logo, a instabilidade por consequência, apresentando por toda extensão do trecho rupturas, ravinas e diversos pontos com processo erosivo acentuado com carreamento de material para o acesso rodoviário (Ver Fig. 26) além da deficiência de dispositivos de drenagem, com a necessidade imediata manutenção ou até mesmo nova adequação com as atuais necessidades encontradas, ausência de descidas d'água, etc.

Figura 25: Visão frontal para o Aterro 4 + 800



Fonte: Inspeção Técnica

Figura 26: Vista para o acesso rodoviário



Fonte: Inspeção técnica

A região se localiza numa feição geológico-geomorfológica denominada de Golfão Maranhense, sendo esta uma articulação regional da costa brasileira caracterizada por

ser um grande e complexo sistema estuarino (área de transição entre o ambiente de água doce e o marinho), destacando-se as baías de São Marcos e São José (a Oeste e Leste da Ilha, respectivamente) (trabalho não publicado).

Apresenta uma geologia local com dois conjuntos de rochas bem distintos e quase, na totalidade da área, está recoberta por Formações Recentes do Período Quaternário, representados pelos sedimentos aluvionares, entre eles os cascalhos, argilas e areias finas bem selecionadas. Entre as rochas, as de maiores ocorrências são aquelas encontradas na Formação do Período Cretáceo, identificados pelos arenitos e argilitos, predominando o cinza, róseo e vermelho da Formação Itapecuru (trabalho não publicado).

O trecho de estudo é caracterizado por uma considerável planície, impondo cortes e aterros baixos. O traçado existente e o eixo projetado se apoiam fundamentalmente em solos coluvionares e residuais da Formação Itapecuru. O padrão da distribuição destes solos define seguramente um processo gradual de assoreamento da bacia, onde os arenitos presentes predominam sobre os siltitos e argilitos. A partir da inspeção geológico-geotécnica feitas neste segmento, foi possível refinar os limites entre domínios geológicos que serão apresentados e ainda criar subdivisões pedológicas evolutivas. Os contatos entre os diversos litotipos são apresentados em relação à quilometragem da ferrovia que cresce no sentido de São Luís à Carajás (trabalho não publicado).

O traçado da ferrovia neste segmento está localizado em região de sedimentos de origem flúvio-marinhos e materiais constituintes do solo natural. Os sedimentos Barreiras são propensos aos diversos tipos de intemperismo e erosão em toda a região, dadas suas características litológicas de rochas mal selecionadas e mal consolidadas, aflorando nas proximidades da área estudada em médio grau de intemperismo. São factualmente perceptíveis pela presença das voçorocas existentes nos sopés das falésias do Farol de São Marcos, na praia do Araçagi, em Panaquatira (em processo de desenvolvimento), no Povoado de Santana e no Parque do Bacanga (trabalho não publicado).

As vistorias de campo foram realizadas objetivando a com identificação de feições de instabilidade, ocorrências de bacias de deposição com potenciais de acumulação de solos moles e demais aspectos pertinentes associados ao planejamento proposto.

4.2 Caracterização geológica

Os mapas geológicos disponíveis da região estão na escala 1:250.000 – Folha São Luís SA-23-Z-A (Rodrigues et al., 1984) e na escala 1:100.000 (Maranhão, 1998). A

sedimentação na região iniciou-se com os sedimentos da Formação Itapecuru (Cretáceo), Formação Barreiras (Neógeno) e, finalmente, os sedimentos recentes da Formação Açuí (Quaternário). Os solos residuais encontrados caracterizam-se pela alta concentração de ferro nos sedimentos areno-argilosos, argilo-arenosos, e arenosos finos, sendo geralmente capeados por extensas formações de laterita (trabalho não publicado).

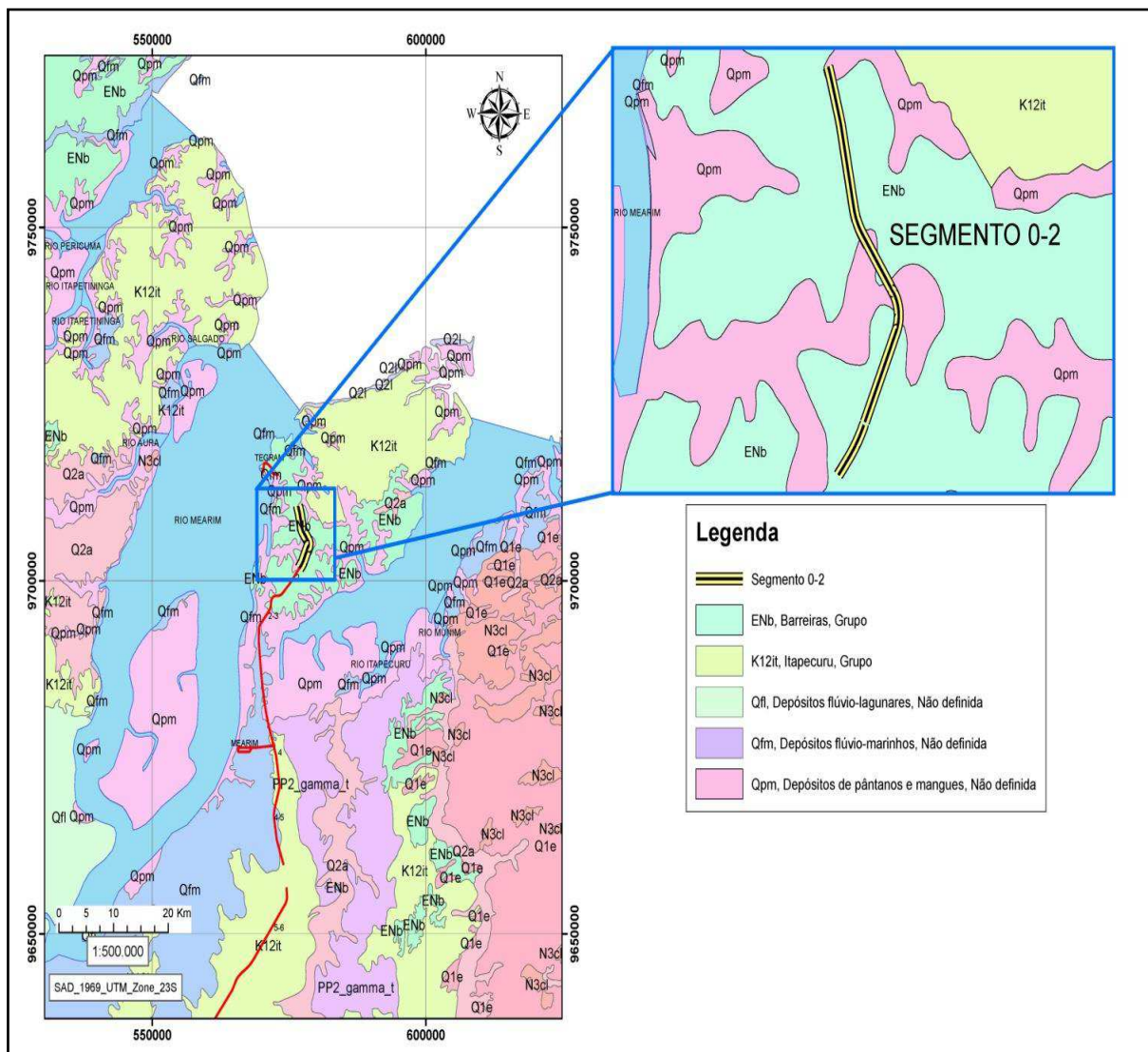
O Quadro abaixo apresenta a síntese das principais características das unidades geológico-geotécnicas, onde são descritas as unidades mapeadas, tecendo-se algumas considerações sobre as características dos materiais, do relevo e localização.

Quadro 6: Principais características das unidades geológicas e geotécnicas

Unidade Geológica	Geomorfologia	Solos	Localização
Formações Superiores	Planície Flúvio-marinha	Sedimentos da Form. Barreiras.	Em quase toda a área do segmento
Sedimentos Quaternários – Formação Açuí	Planície Flúvio-marinha	Sedimentos superficiais argilosos com matéria orgânica, de cor cinza escuro - Mangue.	Distribuído ao longo do litoral banhado pelo rio Mearim e pelo oceano
Sedimentos Quaternários – Formação Açuí	Planície Marinha	Sedimentos arenosos selecionados	Compondo lentes arenosas no interior dos solos argilosos localizados em áreas de baixada
Sedimentos Terciários – Formação Barreiras	Vertentes e Tabuleiro	Solos arenosos bem selecionados com concentrações de laterita	Nos topos das colinas (cortes da ferrovia), se estendendo por todo o segmento.
Solos residuais arenosos – Formação Itapecuru	Vertentes e Tabuleiro	Solos residuais oriundos de siltitos, arenitos e argilitos.	Afloram nos cortes da ferrovia e das estradas na região.
Rochas – Formação Itapecuru	Vertentes	Rochas brancas a róseas	Afloram nos acessos ao segmento.
Embasamento Cristalino	Vertentes	Rochas graníticas e gnáissicas	Afloram na região das Pedreiras.

Fonte: Relatório Técnico da Expansão Linha Tronco EFC – Segmento 01-02

Figura 27: Mapa geológico, extraído da Carta Geológica do Brasil – Maranhão, Folha SA-23 – São Luís – 2008



Fonte: Relatório Técnico da Expansão Linha Tronco EFC – Segmento 01-02

Quanto aos recursos hídricos, o Estado do Maranhão encontra-se quase totalmente incluído na Bacia Sedimentar do Parnaíba, considerada uma das mais importantes províncias hidrogeológicas do país. A estrutura tectônica da bacia é em geral simples, devido à atitude monoclinal das camadas, que mergulham suavemente das bordas para o interior. O pacote de sedimentos da bacia alcança uma espessura de 3000 metros, dos quais 2550 metros são de idade paleozóica e os restantes 450 metros, mesozóica. Por se tratar de uma área de rochas quase exclusivamente sedimentares, o Estado do Maranhão apresenta possibilidades promissoras de armazenamento e exploração de águas subterrâneas (trabalho não publicado).

Acima do embasamento cristalino, que constitui o fundo impermeável geral de toda a bacia, desenvolvem-se três principais aquíferos: Serra Grande, Cabeças e Poti-Piauí. Do ponto de vista hidrogeológico, a unidade sedimentar dominante na área é a Formação

Itapecuru, que tem potencial fraco a médio em função das características areno-argilosas da sua litologia (trabalho não publicado).

A instabilidade ocorrida pode ser caracterizada como uma ruptura rasa de aterro. As origens dessas fraturas podem está associada a pluviosidade intensa e problemas associados a drenagem superficial. A chuva em si pode ter contribuído para redução de resistência de seus materiais pelo umedecimento do corpo do aterro. Há que mencionar que o início do processo de instabilidade acabou por depositar material rompido junto a base do aterro e a parte inferior é composta por material depositado pela própria ruptura, com alto potencial erosivo e elevado risco para novos pontos de ruptura.

4.3 Obtenção dos parâmetros de projeto

Como um dos primeiros parâmetros para o desenvolvimento do projeto, pode-se mencionar a caracterização geotécnica dos solos, para fins de obtenção de parâmetros de resistência ao cisalhamento e de deformabilidade do material. Para a investigação dos solos nas áreas do aterro analisado, foram realizadas sondagens de simples reconhecimento com medidas de SPT, cujas localizações apresentam-se na Figura 28 (trabalho não publicado).

No desenvolvimento do projeto de estabilidade de taludes torna-se importantíssima a pesquisa, coleta e análise dos dados geotécnicos existentes nos projetos das fases anteriores. Quanto para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão - c') e ângulo de atrito assim como os pesos específicos dos materiais constituintes da fundação e dos cortes utilizados nas análises de estabilidade, foram determinados através de correlação com número de golpes NSPT e em alguns pontos os ajustes foram feitos pelo engenheiro geotécnico com base nas investigações de campo (trabalho não publicado).

Para estimativas dos parâmetros do solo no Projeto, a tabela apresentada pelo engenheiro Ivan de Oliveira Joppert Júnior, em seu livro Fundações e Contensões de edifícios no ano de 2007, foi utilizada tomando se como base os valores médios de $N_{SPT's}$ das camadas identificadas.

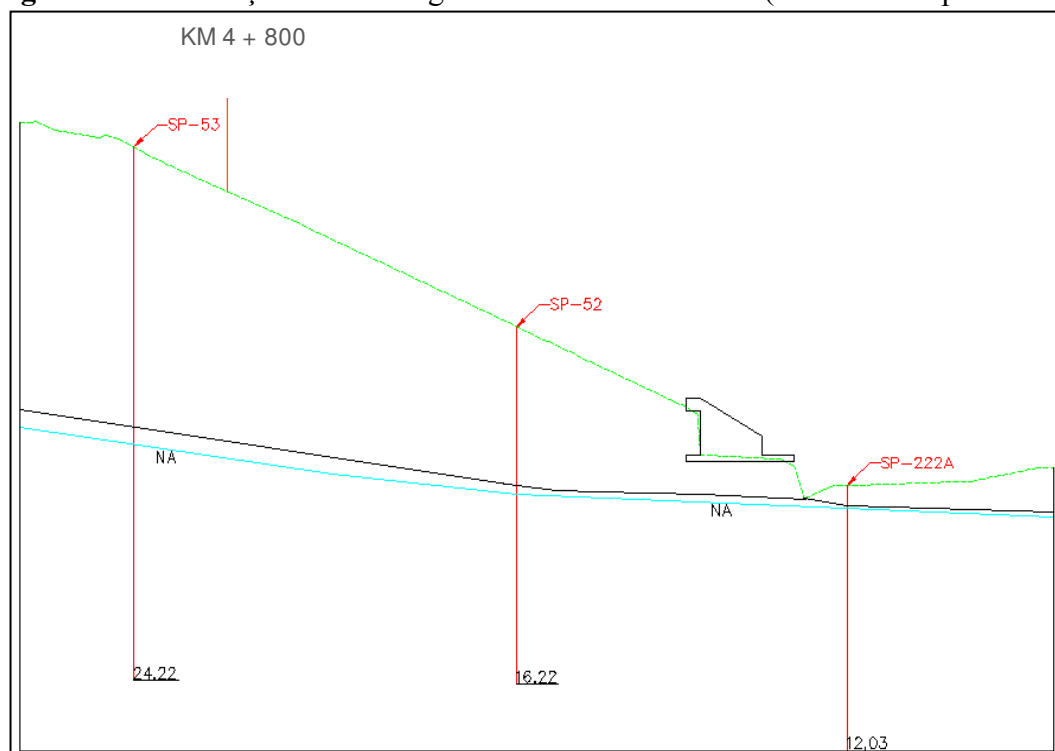
Tabela 6: Parâmetros médios do solo

Tipo de solo	Faixa de STP	Módulo de elasticidade (t/m ²)	Peso específico (g)		Ângulo atrito efetivo (f)	Coesão efetiva (tf/m ²)
			Natural (t/m ³)	Saturado (t/m ³)		
Areia pouco siltosa / pouco argilosa	0 - 4	2000 - 5000	1,7	1,8	25°	—
	5 - 8	4000 - 8000	1,8	1,9	30°	—
	9 - 18	5000 - 10000	1,9	2,0	32°	—
	19 - 41	8000 - 15000	2,0	2,1	35°	—
	≥ 41	16000 - 20000	2,0	2,1	38°	—
Areia média e fina muito argilosa	0 - 4	2000	1,7	1,8	25°	0
	5 - 8	4000	1,8	1,9	28°	0,5
	9 - 18	5000	1,9	2,0	30°	0,75
	19 - 41	10000	2,0	2,1	32°	1,0
Argila porosa vermelha e amarela	0 - 2	200 - 500	1,5	1,7	20°	0,75
	3 - 5	500 - 1000	1,6	1,7	23°	1,5
	6 - 10	1000 - 2000	1,7	1,8	25°	3,0
	≥ 10	2000 - 3000	1,8	1,9	25°	3,0 a 7,0
Argila siltosa pouco arenosa (terciário)	0 - 2	100	1,7	1,8	20°	0,75
	3 - 5	100 - 250	1,8	1,9	23°	1,5
	6 - 10	250 - 500	1,9	1,9	24°	2,0
	11 - 19	500 - 1000	1,9	1,9	24°	3,0
	20 - 30	3000 - 10000	2,0	2,0	25°	4,0
	≥ 30	10000 - 15000	2,0	2,0	25°	5,0
Argila arenosa pouco siltosa	0 - 2	500	1,5	1,7	15°	1,0
	3 - 5	500 - 1500	1,7	1,8	15°	2,0
	6 - 10	1500 - 2000	1,8	1,9	18°	3,5
	11 - 19	2000 - 3500	1,9	1,9	20°	5,0
	≥ 20	3500 - 5000	2,0	2,0	25°	6,5
Turfa / argila orgânica (quaternário)	0 - 1	40 - 100	1,1	1,1	15°	0,5
	2 - 5	100 - 150	1,2	1,2	15°	1,0
Silte arenoso pouco argiloso (residual)	5 - 8	8000	1,8	1,9	25°	1,5
	9 - 18	1000	1,9	2,0	26°	2,0
	19 - 41	15000	2,0	2,0	27°	3,0
	≥ 41	20000	2,1	2,1	28°	5,0

Fonte: Relatório Técnico da Expansão Linha Tronco EFC – Segmento 01-02

Para as estabilidades globais dos aterros e cortes no Projeto, no intuito de indicar as melhores situações das geometrias dos cortes e aterros, dos projetos de terraplenagem e dos processos construtivos, foi feita a simulação da estabilidade do aterro existente e o que será construído para o projeto de Duplicação. A seguir é apresentada a interpretação geológica/geotécnica e a análise de estabilidade.

Figura 28: Localização das sondagens no trecho em estudo (trabalho não publicado).



Fonte: Relatório Técnico

Tabela 7: Valores médios de Nspt

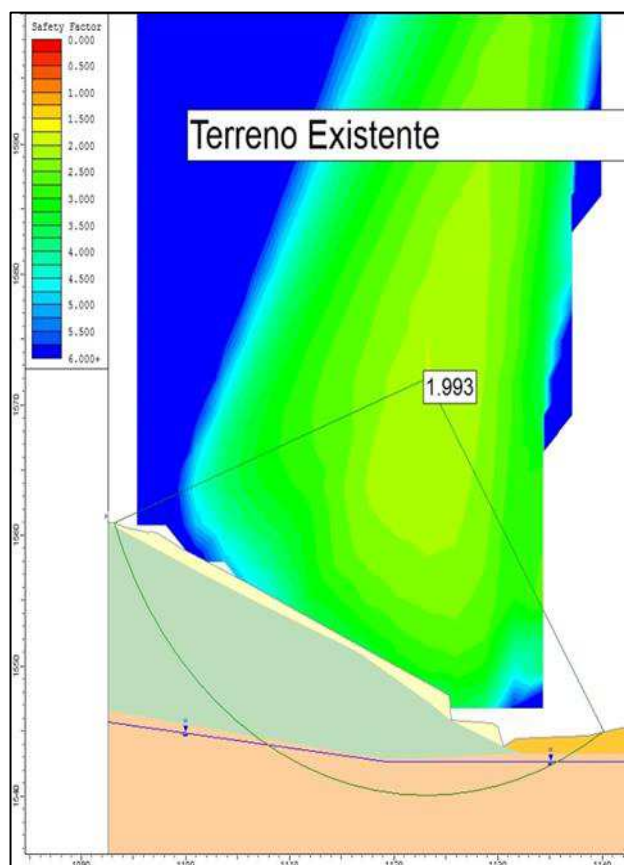
Nº Sondagem	Profundidade (m)	Nspt	Classificação	Coesão efetiva (tf/m²)	Coesão efetiva (kPa)	Ângulo atrito efetivo(°)	Peso específico natural (t/m³)
SP-52	0,00-0,60	15,0	Silte arenoso pouco argiloso (residual)	2,0	19,62	26°	1,9
	0,60-8,50	18,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	32°	1,9
	8,50-14,00	11,0	Silte arenoso pouco argiloso (residual)	2,0	19,62	26°	1,9
	14,00-16,22	41,0	Areia média e fina muito argilosa	1,0	9,81	32°	2,0
SP-53	0,00-0,45	19,0	Silte arenoso pouco argiloso (residual)	3,0	29,43	27°	2,0
	0,45-9,90	24,0	Silte arenoso pouco argiloso (residual)	3,0	29,43	27°	2,0
	9,90-14,00	15,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	32°	1,9
	14,00-18,00	26,0	Silte arenoso pouco argiloso (residual)	3,0	29,43	27°	2,0
SP-222A	18,00-24,22	41,0	Areia média e fina muito argilosa	1,0	9,81	32°	2,0
	0,00-0,90	4,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	25°	1,7
	0,90-2,00	6,0	Argila siltosa pouco arenosa (terciário)	2,0	19,62	24°	1,9
	2,00-12,00	16,0	Areia média e fina muito argilosa	0,75	7,36	30°	1,9
SP-131	0,00-6,00	9,0	Silte arenoso pouco argiloso (residual)	2,0	19,62	26°	1,9
	6,00-15,45	30,0	Silte arenoso pouco argiloso (residual)	3,0	29,43	27°	2,0
SP-63	0,00-13,00	35,0	Silte arenoso pouco argiloso (residual)	3,0	29,43	27°	2,0
	13,00-24,23	3,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	25°	1,7
SP-62	0,00-3,00	10,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	32°	1,9
	3,00-9,00	4,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	25°	1,7
	9,00-13,19	28,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	35°	2,0
	0,00-4,00	4,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	25°	1,7
SP-223A	4,00-11,31	25,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	35°	2,0
	0,00-9,00	35,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	35°	2,0
SP-11	9,00-16,00	9,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	32°	1,9
	16,00-20,45	32,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	35°	2,0
SP-227A	0,00-8,00	3,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	25°	1,7
	8,00-13,24	30,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	35°	2,0
SP-14	0,00-3,00	6,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	30°	1,8
	3,00-8,45	26,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	35°	2,0
SP-15	0,00-2,00	8,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	30°	1,8
	2,00-8,00	22,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	35°	2,0
	8,00-9,45	50,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	38°	2,0
SP-70	0,00-11,00	12,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	32°	1,9
	11,00-24,18	23,0	Areia pouco siltosa / pouco argilosa	-	1,00	35°	2,0

Fonte: Relatório Técnico da Expansão Linha Tronco EFC – Segmento 01-02

Para o aterro em análise, pelo histórico de relatórios técnicos referentes a estudos de estabilidade foi possível resgatar a simulação de estabilidade do aterro (software

computacional Slide versão 6.004 da Rocscience) que já era existente e o que na época seria construído para o projeto de Duplicação, no caso, o talude de estudo deste trabalho. São apresentadas nas Figuras 29 e 30 as análises de estabilidade do terreno existente e do terreno em estudo, respectivamente.

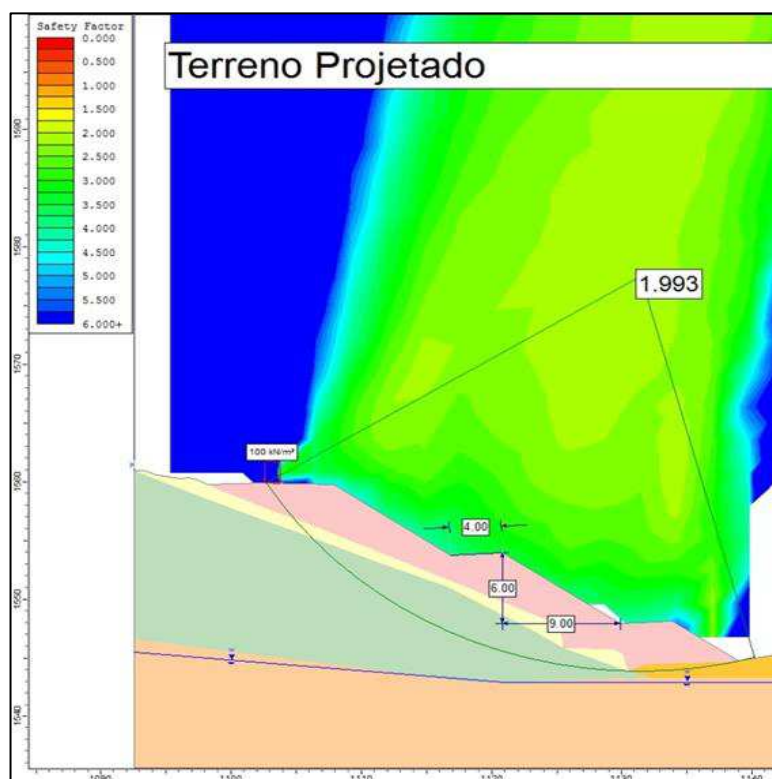
Figura 29: Simulação de estabilidade do terreno existente (trabalho não publicado).



Material Name	Color	Unit Weight	Strength Type	Cohesion	Phi (deg)	Water Surface	RU
Silte arenoso		19	Morh-Colomb	19.62	26	Water Surface	
Silte arenoso		20	Morh-Colomb	29.43	27	Water Surface	
Areia Siltosa		19	Morh-Colomb	7.43	30	Water Surface	
Solo fofo		17	Morh-Colomb	1	25	Water Surface	

Fonte: Relatório Técnico da Expansão Linha Tronco EFC – Segmento 01-02

Figura 30: Simulação de estabilidade do aterro em estudo (trabalho não publicado)



Material Name	Color	Unit Weight	Strength Type	Cohesion	Phi (deg)	Water Surface	RU
Silte arenoso		19	Morh-Colomb	19.62	26	Water Surface	
Silte arenoso		20	Morh-Colomb	29.43	27	Water Surface	
Areia Siltosa		19	Morh-Colomb	7.43	30	Water Surface	
Solo fofo		17	Morh-Colomb	1	25	Water Surface	

Fonte: Relatório Técnico da Expansão Linha Tronco EFC – Segmento 01-02

O fator de segurança encontrado nas simulações acima se encontram numa boa faixa de segurança, $1,993 > 1,5$, e diante dos dados foi possível recomendar para os aterros uma inclinação de 3 (H): 2 (V), banquetas com 6 metros de altura e 4 metros de largura, exceção na estrada de serviço no início do projeto com inclinação de 1(H):1(V), assim projetada pelo setor de geometria (trabalho não publicado).

5 PROPOSTAS DE SOLUÇÕES TRADICIONAIS E DE BIOENGENHARIA

5.1 Solução proposta

Para concepção da solução de recuperação de taludes foram analisadas diversas situações considerando todos os aspectos anteriormente mencionados, alinhados a NBR 111682 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009).

Uma grande dificuldade para o desenvolvimento da solução viável foi a questão da sua situação de localização, pois o talude em estudo faz parte de uma plataforma ferroviária com uma entreeva, projetado justamente para atender ao projeto de expansão de uma ferrovia nordeste de carga pesada.

Para o desenvolvimento da concepção da solução foi considerado execuções com medidas práticas e objetivas, com ganho de execução e que ao menos tempo atenda os requisitos exigidos de recuperação de taludes de acordo com suas características geológicas, como fora proposto desde o início deste trabalho.

Logo para a escolha da técnica apropriada para a estabilização do talude de aterro foram estudados diversos métodos de estabilização de taludes terrosos.

Nesse estudo foram levadas em consideração as seguintes questões:

- Prazo da execução;
- Questões geotécnicas;
- Limitantes geométricos;
- Residências nas proximidades;
- Método executivo;
- Viabilidade econômica;

A seguir serão citados e descritos alguns Métodos Clássicos ponderados para este trabalho e sua possível viabilidade ou não.

- Retaludamento: Técnica de terraplanagem, no qual os taludes sendo naturais ou não em processo de instabilidade são alterados por cortes e aterro a fim de se obter a estabilidade desejada. Portanto, apesar da sua simplicidade e eficácia, o Retaludamento torna-se inviável, pois para que possa haver um aumento na estabilidade através desse método, são feitas alterações na geometria do talude, aliviando o peso junto à crista e acrescentando junto ao pé do talude, modificações

estas que afetaria a largura da plataforma ferroviária, tornando assim inviável por questões técnicas. Situação esta que se configura em casos onde não há espaço suficiente para se alcançar o Retaludamento com a declividade desejada.

- Muro de Arrimo: Técnica de conter maciços de terra com inclinação elevada para impedir possíveis deslizamentos de solo. Porém este método foi classificado como inviável, pois neste caso, logo na concepção do projeto já seria apontado à interferência, tanto nas etapas de execução como estruturação final desta técnica, ao acesso rodoviário da ferrovia, inviabilizando dessa forma a sua implantação.
- Solo Reforçado com Geotêxtil: Técnica baseada na interação do material de construção da estrutura que é constituído de solo associado a inclusões a tração. Entretanto, este método torna-se inviável pelos mesmos motivos elencados anteriormente, pois sua implantação implicaria na interferência ao off-set da ferrovia.
- Solo Grampeado: Técnica de melhoria de solos, que permite a contenção de taludes por meio da execução de chumbadores, concreto projetado e drenagem. Os chumbadores promovem a estabilização geral do maciço, o concreto projetado dá estabilidade local junto ao paramento e a drenagem age em ambos os casos. O solo grampeado tornou-se uma solução viável, mas não seria a mais adequada pois haveria ainda possibilidade de prejudicar a estabilidade da plataforma ferroviária, por se tratar de uma talude naturalmente arenoso, consequentemente deficiente em relação a coesão, logo a profundidade de perfuração dos grampos seriam maiores, necessitando de perfurações mais profundas podendo então afetar a estabilidade da plataforma ferroviária ao interferir no bulbo de tensões da estrada de ferro causando assim uma possível interdição, gerando impactos inestimados para a ferrovia.

Diante de todas as limitantes expostas em relação à execução de alternativas de soluções, a recuperação do talude de aterro por meio de técnicas de bioengenharia é a melhor alternativa, uma vez que, não haverá interferência ao offset da plataforma ferroviária. A mesma ainda apresenta uma maior praticidade na implantação com menor movimentação de solo e utilização de máquinas, o que significa também em menor custo alinhados a um menor impacto ao meio ambiente.

Logo, para concepção da solução de bioengenharia de solos o objetivo foi realizar medidas práticas, com ganho de execução e que ao menos tempo atenda os requisitos exigidos de recuperação de taludes de acordo com suas características geológicas.

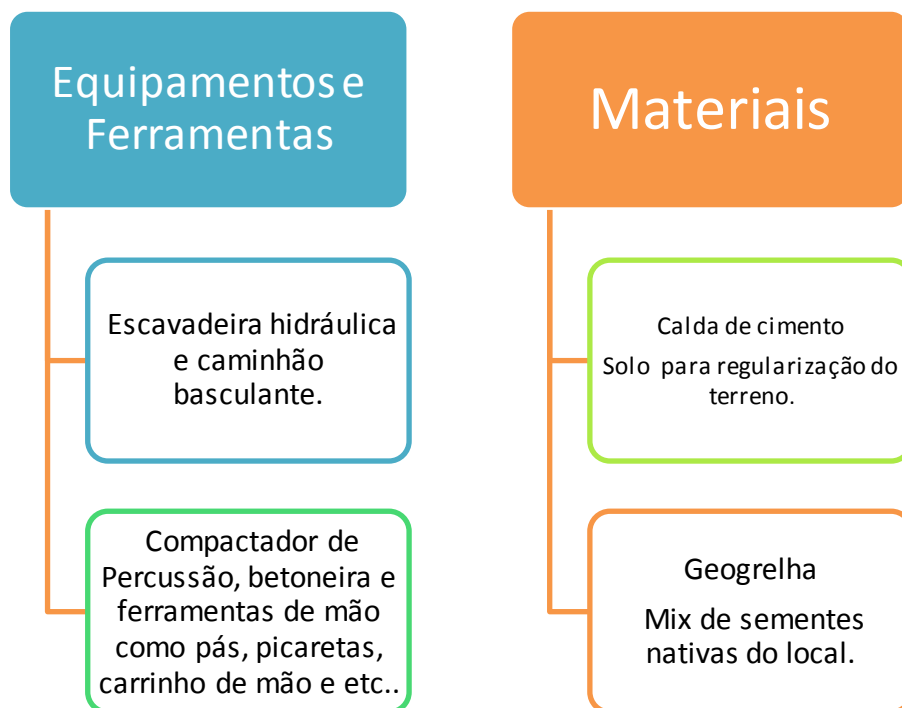
Dentro das soluções estudadas e levando em consideração as limitantes de projeto, a solução que melhor atenderia o objetivo seria a adequação conjunta do sistema de drenagem-pavimento ferroviário com a recuperação do talude do aterro com revestimento vegetal. A recomposição está combinada com a restauração dos trechos fissurados com calda de cimento ou solo compactado, onde o topo seria selado com camada de aterro compactado e proteção de revestimento vegetal. Utilização também do chamado “rachãozinho” (ou pedra de mão jogada) para ajudar a estabilizar. Recomposição da vegetação do talude nos ainda poderia ter da geogrelha que atuaria tanto na proteção física do talude, como auxiliaria em parte na drenagem superficial.

Serão representados, em forma de fluxograma nas figuras 32 e 33 respectivamente, a execução da recuperação do talude como deverá ser feita, assim como a apresentação dos equipamentos e materiais necessários.

Figura 32: Fluxograma de execução de recuperação do talude



Figura 33: Fluxograma referente a equipamentos, ferramentais e materiais utilizados.



Fonte: Autoria Própria

5.2 Metodologia da solução

O estudo de caso, onde está sendo proposta uma alternativa de Engenharia Natural, situa-se em um talude localizado no município de São Luís-MA. A metodologia empregada é fundamentada nos métodos de Engenharia Natural caracterizada pela interação de elementos inertes e vivos. Em linhas gerais, estas técnicas são fortemente empregadas em locais que não apresentam problemas acerca de estabilidade geotécnica, como é caso do trabalho apresentado. A seguir serão descritas técnicas e metodologias a serem empregadas na estabilização e controle de processos erosivos, de acordo com os estudos de PEREIRA (2001):

- Retirada dos sedimentos soltos: Consiste na remoção, manual ou mecânica, dos sedimentos soltos e também os que estiverem instáveis. Há preferência pela retirada manual, já que o uso de máquinas pode tornar locais estáveis em instáveis ou susceptíveis à erosão.
- Proteção das cabeceiras contra erosões: Através da construção de canaletas de drenagem, barreiras protetoras, leiras envolvidas por biotêxtil e utilização de bermalongas.

- Drenagem: Realização de canaletas e escadas dissipadoras, para captar as águas pluviais protegendo contra os processos erosivos, evitando que todo o serviço executado seja danificado.
- Leiras envolvidas por biotêxtil: Construída de acordo com o tamanho do foco erosivo a fim de direcionar o fluxo da água reter sedimentos e permitir a infiltração da água no solo. A leira deverá ser compactada manualmente, o local deverá ser preparado com sementes e fertilizantes para assim receber uma Manta Fibrax.
- Bermalongas: Material totalmente drenante resistente, com dimensões de 40cm de diâmetro e 2m de comprimento, é capaz de absorver 5 vezes o seu peso em água.
- Ancoramento dos sedimentos: Técnica utilizada para evitar que a chuva comprometa o serviço realizado enquanto a vegetação não se estabeleça. O ancoramento pode ser através de gabião, arrimo, paliçadas de madeira ou de bermalonga, e com a própria bermalonga.
- Preenchimento de espaços vazios: Necessário quando permanecem locais vazios, mesmo depois de realizada a regularização e ancoramento. Esse preenchimento é feito com bermalongas menores fixadas com estacas de madeira, e logo após cobertas com solo vegetal em conjunto com sementes e fertilizantes, para o sucesso da revegetação de forma mais rápida.
- Revestimento vegetal: Etapa final no processo de recuperação de áreas erodidas, realizada para que proteja o solo.

5.3 Desenvolvimento da solução proposta

Para a recuperação do talude, cada problema constatado no talude terá uma solução de bioengenharia específica, deste modo as Fig. 34, Fig.35, Fig.36 e Fig 37 demonstram a localização de cada problema.

Os serviços de recuperação do talude deverão iniciar pelas áreas classificadas com X, conforme mostra a figura 34, tratando as erosões.

Figura 34: Vista do pé do aterro



Fonte: Inspeção Técnica

Logo após deverá ser feita a selagem da crista do aterro com camada de aterro compactado e proteção de revestimento vegetal, conforme indicado na figura 35.

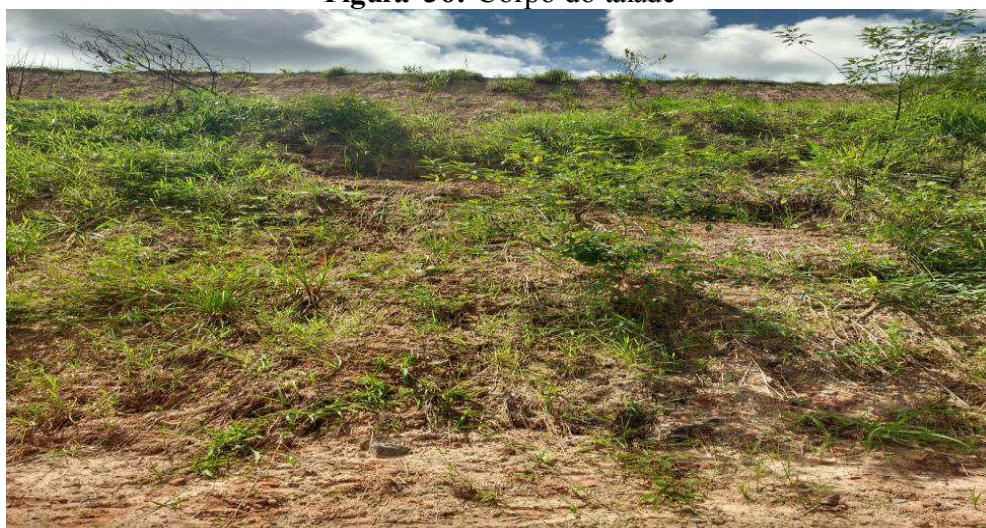
Figura 35: Crista do talude



Fonte: Inspeção Técnica

Pra finalizar estas etapas de estabilização, realizar a regularização de todo corpo do talude, áreas destacadas nas figuras 36 e 37.

Figura 36: Corpo do talude



Fonte: Inspeção Técnica

Figura 37: Área para regularização



Fonte: Inspeção Técnica

5.4 Execução

Primeiramente, as erosões mais acentuadas deverão ser escalonadas para uma melhor acomodação dos rachãozinhos (pedra de mão).

As pedras de mão arrumada ou por pedras jogadas são conhecidas como técnica na construção civil por enrocamentos de pedras. São estruturas constituídas de pedra com granulometria definida pra sua funcionalidade, com ou sem emprego de aglomerante. A sua aplicação neste estudo tem por finalidade atuar na recuperação de erosões e proteção de taludes, protegendo de forma prática e eficaz o talude estudado. Para este trabalho foi escolhido a utilização da pedra de mão que permitem a aplicação manual, pontual com a finalidade de menor utilização de maquinário possível.

Feito o escalonamento nas áreas erodidas, dá-se a acomodação das pedras de mão cuidadosamente colocadas umas sobre as outras, podendo haver uma argamassa entre as pedras ou não ter argamassa, sendo as pedras simplesmente apoiadas uma nas outras.

Claramente, os materiais empregados devem obedecer às especificações correspondentes para cada obra segundo sua funcionalidade.

Em relação ao posicionamento das pedras, é recomendado que sejam feitas de forma manual com o propósito de obter um arranjo com a finalidade de garantir um maior travamento, ressalta-se que o posicionamento das pedras deverão atender a inclinação do talude de 1(V):1,5(H) e alinhamento.

O próximo passo corresponde à determinação de resolução para as fissuras encontradas na extensão do talude. Logo, como alternativas para trincas longitudinais expostas ao longo do talude tem-se o preenchimento destas ravinas por solo compactado, nata de cimento etc. Para escolha foi determinado a calda de cimento. Enquanto o topo do talude será selado com camada de aterro compactado e proteção de revestimento vegetal.

Realizada todas as atividades referentes a correção de estabilidade, deverá ser feita a regularização do talude para execução da drenagem superficial e aplicação da geogrelha e revegetação. Será executado o preparo da superfície, manual em condições locais, de modo a se constituir uma superfície regularizada, para o bom aspecto visual e reintegração ao ambiente circundante por meio da vegetação.

Como terceira etapa do processo executivo após a regularização, tem-se a aplicação das geogrelhas. São estruturas constituídas por materiais planares, em forma de grelhas, com grandes aberturas ou vazios. As propriedades físicas e mecânicas variam de acordo com a necessidade cada projeto determinando assim o tipo de tela da geogrelha utilizada. A geogrelha é sugerida como um elemento de solução para atuar em duas funcionalidades principais e que atendem de forma bastante eficaz a problemática acerca deste trabalho: atuação em forma de reforço na recomposição do aterro como no revestimento na proteção de taludes contra erosão.

Outra vantagem da sua aplicação neste tipo de solução é que a geogrelha dissipa a água na superfície do talude, minimizando e, até mesmo, eliminando os ravinamentos, funcionando perfeitamente como elemento de drenagem superficial.

O DNIT comenta ainda a funcionalidade da técnica anteriormente mencionada, ressaltando sua importância:

A aplicação das mantas ou telas antierosivas sobre o solo de fraca estrutura e grande fragilidade ao processo erosivo tem sido bastante útil, pois, insere na superfície do mesmo uma nova estrutura que permitirá o desenvolvimento das espécies vegetais selecionadas, como também, o restabelecimento do sistema de drenagem natural. Estes dispositivos fundamentados na bioengenharia, são de grande utilidade na obturação de escorregamentos parciais de taludes ou encostas, associados a formação de erosões em sulcos ou ravinas, reconstituindo-os à superfície primitiva e agregando o aspecto visual agradável de reintegração ao ambiente circundante.

Quanto a sua aplicação, o DNIT comenta:

As mantas ou telas serão grampeadas ao longo da superfície, onde é executada uma valeta para receber a primeira linha de grampos e fixar a parte superior da manta ou tela.

A fixação inadequada da biomanta gerará dificuldade para que a vegetação a ultrapasse o que poderá gerar focos erosivos no local de má aderência, devido ao escoamento livre da água na superfície do talude, que estará sem a proteção da biomanta.

O número de grampos na fixação da Tela de proteção é de acordo com as condições em que o talude se encontra e suas características. Segundo DNIT (2006), esta fixação poderá ser feita com grampos de aço, madeira, bambu ou polivinil, de tamanhos e formas variadas, devendo ser aplicada conforme detalhado em projeto, de acordo com as características específicas do local a ser protegido ou recuperado. Entende-se também que para solos não coesos e arenosos, os grampos mais compridos são os mais indicados, que no caso é o que se mais adequa ao estudo de caso.

Entende-se por hidrossemeadura a aplicação com bomba hidráulica, via aquosa, de sementes misturadas com adubos minerais, massa orgânica e adesivos de fixação.

Considerando que a superfície do talude esteja a mais regularizada possível, sendo sido eliminados já as fissuras mencionadas anteriormente pela técnica de selagem das trincas, inicia-se então o preparo do solo, que consiste em efetuar o microcoveamento, ou seja, covas pequenas uma próximas das outras e com profundidade suficiente para reter todos os insumos a serem aplicados, como fertilizantes, corretivos, mulch, adesivos e sementes. A seleção das espécies deve basear-se em critérios de adaptabilidade edafoclimática, rusticidade, capacidade de reprodução e perfilhamento, velocidade de crescimento e facilidade de obtenção de sementes na região trabalhada.

Pra melhor elucidação do que fora mencionado, O DNIT comenta:

Após a regularização da superfície do talude e a restauração do sistema de drenagem, inicia-se o preparo do solo, que consiste em efetuar o micro-coveamento, ou seja, covas pequenas umas próximas das outras e de profundidade suficiente, de maneira a reter todos os insumos a serem aplicados, como fertilizantes, corretivos, mulch, adesivos e sementes.

Segundo DNIT (2006), O coveamento do talude é executado com a utilização de ferramentas tipo enxada e o espaçamento entre covas deverá ser de 10cm, com profundidade de 5cm. Estes insumos podem ser aplicados manualmente ou por via aquosa (hidrossemeadura) e a quantidade a ser aplicada deve ser previamente estabelecida pelo técnico responsável pelo projeto, ou consultando a norma correspondente.

6 CONCLUSÃO

Conforme proposto nos objetivos específicos deste trabalho foi possível descrever os métodos propostos, o de bioengenharia de solos e os clássicos, assim como analisar de forma conceitual, embasado por bibliografias e dados geotécnicos obtidos da região, o talude de aterro proposto para recuperação acentuadamente vegetal.

Foi proposto também a realização de comparativos entre as técnicas de engenharia Natural e método Tradicional, onde a bioengenharia se destacou como a mais viável em diversos aspectos como menor custo, movimentos de terras, sem grandes impactos ao meio ambiente, além de não causar a interdição da ferrovia.

A solução de bioengenharia mostrou-se como a única alternativa viável para o estudo. Foi possível no decorrer do trabalho assimilar seu sucesso na atuação contra erosão, assim como seu papel atuante na própria estabilidade estrutural com meio dos efeitos das raízes, por exemplo.

Porém foi possível detectar alguns pontos de atenção como o aumento substancial da coesão no solo como consequência da interação solo, homem e vegetação. Relações estas que se não tratadas ou monitoradas podem ao invés de atuar a favor da estabilidade, se torna o próprio agente instabilizador. Por isso a importância da realização de pesquisas para determinar as melhores espécies a serem utilizadas na região para cada época do ano, por exemplo.

Por isso, entende-se que o estudo dos processos erosivos torna-se cada vez mais importante, na proporção em que se a elaboração de projetos voltados para esta finalidade, sendo possível a identificação acerca da dinâmica dos mecanismos naturais e os antrópicos podem influenciar nesses processos, de forma positiva ou negativa, sendo que as negativas não se restringem apenas a perdas materiais, podem ocorrer vidas humanas.

Portanto, conclui-se que há sim alternativas para recuperação e estabilidade de taludes onde não há tanta agressividade com o meio ambiente e que ao mesmo tempo não comprometa o desenvolvimento econômico almejado. Além da oportunidade de esclarecer que estas técnicas naturais podem ser tão eficazes quanto as tradicionais, apresentando na maioria dos casos maior viabilidade em todos os aspectos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 11682: estabilidade de taludes. São Paulo, 2009

COUTO, L. Técnicas de bioengenharia para vegetação de taludes no Brasil. CBCN, 2010. Viçosa. Minas Gerais.

DEFLOR BIOENGENHARIA. Guia de Instalação de Biomantas Antierosivas, Redutores de Sedimentos e Hidrossemeio. (2008-2016) Belo Horizonte – MG.

DIAS, D. M.; SANTOS, E. C.; GOMES, D. P. P.; Bioengenharia Dos Solos para Estabilização de taludes aplicadas nas indústrias nucleares do Brasil – INB. (2010-2015) Itapetinga, Bahia.

DNIT. Norma DNIT 074/2006 – ES. Tratamento Ambiental de Taludes e Encostas por Intermédio de Dispositivos de Controle de Processos Erosivos. – Especificação de Serviço.

EHRlich, M; BECKER, L.; Muros e taludes de solo reforçado: projeto e execução. 2009. São Paulo: Oficina de Textos.

ERB, R. T. The effect of roots on the shearing strength of soil. 1985. 94f. Thesis (Degree of Master of Science). Departamento f Civil Engineering. The Ohio State University, Ohio

FILHO, H.; SANTOS, R.; CARNEIRO, W.; A bioengenharia na estabilização de taludes e encostas naturais da cidade de Salvador-BA. 2014. UNIFACS, Bahia.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O.; Processos erosivos e recuperação de áreas. São Paulo: Oficina de Textos, 2013

LEMES, M. R. Revisão dos efeitos da vegetação em taludes. 2001. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LEWIS, L. Soil Bioengineering na Alternative for Roadside Management: a practical guide. San Dimas, Califórnia: Unidet States Departamant of Agrigulture, 2000.

LUCENA, L. Bioengenharia de solos: Em recuperação de áreas degradadas. Regularização proteção de corpos d' água e estabilização de taludes e encostas. 2009. 40ª Conferência Anual. Reno, Nevada.

MARAGON, M. Tópicos em Geotécnica e Obras de Terra. Vol. 1. 2006. Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais.

MOLITERNO, A. Caderno de muros de arrimo. São Paulo, Edgard Blucher, 1980.

PEREIRA, A.R. Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão. 2006. Belo Horizonte, Minas Gerais.

PEREIRA, A. R. Controle e recuperação de processos erosivos com técnicas de bioengenharia. 2001. Belo Horizonte, Minas Gerais. Disponível em: <http://www.labogef.iesa.ufg.br/links/simposio_erosao/articles/t074.pdf> Acesso em: 04 out. 2016.

PINTO, G. M. Bioengenharia de Solos na Estabilidade de Taludes: comparação com uma solução tradicional. 2009. 74f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PORTAL EDUCAÇÃO. História da bioengenharia. 2013. Disponível em: <<http://www.portaleducacao.com.br/engenharia/artigos/25712/historia-da-bioengenharia>> Acesso em: 20 set. 2016.

RAMPAZZO, L. Metodologia Científica. 2005. São Paulo, São Paulo.

REIS, M. F. C. Metodologia da Pesquisa Científica. 2008. Curitiba, Paraná.

Relatório Técnico da Expansão Linha Tronco EFC – Segmento 01-02

SALES, C. L. A. Bioengenharia de solos em Talude Erodido: comparação com uma solução tradicional. 2015. 64f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, São Luís.

SILVA, R. A. Aplicação da Engenharia Natural na Estabilização de Taludes. 2012. Universidade da Madeira, Funchal, Portugal.

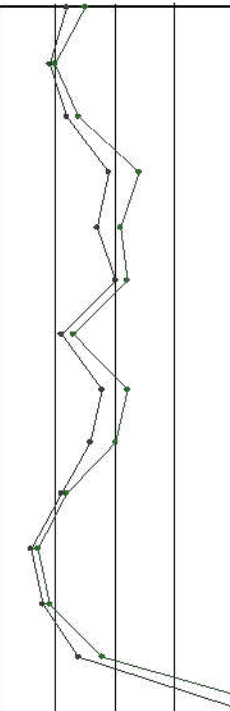
VALE. Manual Técnico de Via Permanente. 2013. Belo Horizonte, Minas Gerais.

ANEXOS

Perfil Individual de Sondagem SP - 222

PERCUSSÃO (SPT)				INFILTRAÇÃO ENSAIO		PROFUNDIDADE (m)			DESCRIÇÃO DO MATERIAL	REVESTIMENTO	
30cm INICIAIS		GOLPES 30 cm		LAVAGEM POR TEMPO c.m. min.	TEST E Nº	ABSORÇÃO K= cm/seg	GRÁFICA	MUDANÇA DE CAMADA			CONVENIÊNCIAS GRÁFICAS
GOLPES/30cm		INICIAIS	FINAIS								
0	10	20	30	40							
01								0,00			Areia fina siltosa, fofa cor cinza clara.
02								0,90			Argila siltosa arenosa medianamente compacta cor cinza escura.
03								2,00	1,41		
04								4,00			Areia média fina siltosa medianamente compacta cor amarela claro c/ pedregulho.
05								5,38			
06								6,00			
07								8,00			Areia fina média siltosa, compacta muito compacta cor amarela claro c/ ped. fino
08								10,00			
09								12,00	12,03		
10											LIMITE DE SONDAJEM: 12,03
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
Obs.: A 41,00 m do Lado Direito											
TRECHO: LOTE 01						SUBTRECHO: Km 4+800				SONDAJEM Nº SP- 222 A	
Coordenada		Cota Boca		NÍVEL D'ÁGUA		OPERADOR: ZÉ DANTAS			DATA: 13/7/2007		
9.705.608,31	578.429,51	10,120	Inicial: 1,05m	24 horas: 1,05m	Final: 1,05m						

Perfil Individual de Sondagem SP - 52

PERCUSSÃO(SPT)					LAVAGEM POR TEMPO cm/min.	INFILTRAÇÃO ENSAIO		PROFUNDIDADE (m)			DESCRIÇÃO DO MATERIAL	REVESTIMENTO		
GOLPES 30 cm						TESTE E N°	ABSORÇÃO K= cm³/seg	GRÁFICA	MUDANÇA DE CAMADA	CONVENÇÕES GRÁFICAS				
GOLPES/30cm														
					INICIAIS	FINAIS								
— 30cm INICIAIS — 30cm FINAIS					10	20	30	40						
					12	15								
					9	10								
					12	14								
					19	24								
					17	21								
					20	22								
					11	13								
					18	22								
					16	20								
					11	12								
					6	7								
					8	9								
					14	18								
					42	50								
					55									
					60/26									
					61/22									

Perfil Individual de Sondagem SP - 53

PERCUSSÃO (SPT)						LAVAGEM POR TEMPO cm/min.	INFILTRAÇÃO ENSAIO		PROFUNDIDADE (m)			DESCRIÇÃO DO MATERIAL	REVESTIMENTO	
— 30cm INICIAIS 30cm FINAIS					GOLPES 30 cm		TESTE N°	ABSORÇÃO K= cm³/seg	GRÁFICA	MUDANÇA DE CAMADA	CONVENÇÕES GRÁFICAS			
GOLPES/30cm					INICIAIS									FINAIS
0	10	20	30	40										
00					49	55				20,00				Areia grossa muito compacta cor vermelho
01					53	58/25								
02					58	60/23								
03					60/22									
04										24,00	24,22		LIMITE DA SONDAAGEM 24,22	
05														
06														
07														
08														
09														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16										30,00				
17										32,00				
18										34,00				
19										36,00				
20										38,00				
21										40,00				

OBS: 6,50 m do lado direito

TRECHO:				SUB TRECHO:				SONDAGEM N.º	
LOTE 01				Km 4+800				SP- 53	
Coordenada		Cota Boca	NÍVEL D'ÁGUA			OPERADOR:		DATA:	
9705624,794	578458,908	24,088	Iniciat 14,20 m	24 horas: 13,50 m	Final:	JOSE ANTONIO		20/9/2007	