



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

RODRIGO LEITE

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE BIOMANTA E ENROCAMENTO DE
PEDRAS UTILIZADOS NA PROTEÇÃO SUPERFICIAL DE TALUDES DE UM
COMPLEXO SOLAR FOTOVOLTAICO**

**JOÃO PESSOA - PB
NOVEMBRO, 2023.**

RODRIGO LEITE

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE BIOMANTA E
ENROCAMENTO DE PEDRAS UTILIZADOS NA PROTEÇÃO
SUPERFICIAL DE TALUDES DE UM COMPLEXO SOLAR
FOTOVOLTAICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do
Curso de Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Federal da
Paraíba como requisito para
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Lopes
Soares

**JOÃO PESSOA - PB
NOVEMBRO, 2023.**

FOLHA DE APROVAÇÃO

RODRIGO LEITE

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE BIOMANTA E ENROCAMENTO DE PEDRAS UTILIZADOS NA PROTEÇÃO SUPERFICIAL DE TALUDES DE UM COMPLEXO SOLAR FOTOVOLTAICO

Trabalho de Conclusão de Curso em 14/11/2023 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Fábio Lopes Soares

Dr. Fábio Lopes Soares

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO

Aline Flávia Nunes Rênegio Antunes

Dra. Aline Flávia Nunes Rênegio Antunes

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO

Isabelle Yruska de Lucena Gomes Braga

Dra. Isabelle Yruska de Lucena Gomes Braga

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

L533a Leite, Rodrigo.

Análise Comparativa entre Biomanta e Enrocamento de Pedras Utilizados na Proteção Superficial de Taludes de um Complexo Solar Fotovoltaico / Rodrigo Leite. - João Pessoa, 2023.

103 f. : il.

Orientação: Fábio Lopes Soares.

TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Energia solar fotovoltaica. 2. Proteção de taludes. 3. Biomanta. 4. Erosão. I. Soares, Fábio Lopes. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 624(043.2)

*A Deus, que se mostrou criador, que
foi criativo. Seu fôlego de vida em
mim me foi sustento e me deu
coragem para questionar realidades
e propor sempre um novo mundo de
possibilidades.*

*À minha mãe, meus irmãos e ao
meu pai, pelo amor, pelo apoio
incondicional, por acreditarem e
investirem nos meus sonhos.*

*Às minhas primas Grazyelle e
Maremília pelo suporte especial de
sempre e por não terem soltado a
minha mão nos dias em que mais
precisei.*

*Às minhas tias, pelo carinho
especial, pelo incentivo, por serem
as minhas melhores amigas e se
mostrarem sempre dispostas a me
ajudar em tudo.
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me proporcionado condição física e intelectual para conduzir todo o trabalho, cuidando e suprimindo todas as necessidades que permearam a elaboração deste.

À senhora Maria do Carmo Leite, minha mãe, agradeço pelo incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço, e pelo apoio incondicional. É hoje a minha força motriz e configura a razão maior de todas as conquistas que alcanço.

Aos senhores Marcelo Leite e Rafael Leite, meus irmãos, por me apoiarem e compreenderem as minhas necessidades. O amor e carinho que têm por mim fazem toda a diferença e servem de combustível para que eu prossiga sempre em direção ao alvo.

Ao meu pai Netário Xavier, pelo importante suporte dado em muitas etapas dessa jornada e por sempre ter me apoiado em todas as decisões acadêmicas.

Aos meus tios e primos de uma forma geral que nunca mediram esforços para me auxiliar. Em especial minhas tias Anita Pereira, Aparecida Leite, Graça Leite e Valdelúcia Leite que como mães sempre cuidaram de mim e acompanharam de perto todas as etapas da minha vida, inclusive a elaboração desse trabalho.

As minhas primas Grazyelle Andrade e Maremília Andrade eu preciso salientar os agradecimentos por terem sido mais que primas, serem grandes irmãs. Sempre me apoiaram incondicionalmente em tudo, sobretudo, na reta final desse trabalho onde estiveram andando lado a lado comigo. Sem elas eu não teria conseguido.

Ao meu orientador Fábio Lopes Soares, por aceitar de prontidão o desafio dessa pesquisa e por ter conduzido todo o processo com paciência, solicitude e eficiência. Mais do que um profissional, é um grande ser humano que em muitos momentos me trouxe palavras de fé e encorajamento, as quais muito me ajudaram a não desistir. Sou imensamente grato por todos os ensinamentos, que foram além da técnica e da academia.

A minha banca examinadora composta primeiramente pela professora

Isabelle Yruska que com sua gentileza e paciência, abraçou-me de forma especial desde que entrei nessa universidade. Foi minha orientadora do Projeto de Extensão onde muito pude aprender com sua competência e profissionalismo. E secundamente à professora Aline Remígio, a qual tive o prazer de cursar as disciplinas de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos e Tópicos I: Geossintéticos. Acredito que se aqui escrevesse laudas e laudas ainda não conseguiria exprimir toda gratulação que tenho. Mais do que uma professora, é uma mãe, amiga, irmã, uma psicóloga. Desde o início me acolheu de uma forma especial nessa universidade e me ensinou conteúdos que vão muito além da academia. Gratidão demasiada eu sinto por todas as chamadas de voz, todas as palavras, todo o carinho. Ela foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

Aos meus amigos e colegas de curso, tanto da Universidade Federal da Paraíba quanto da Universidade Federal de Campina Grande, com os quais dividi diversos momentos ao longo da graduação e que fizeram dessa jornada um tanto mais leve, muito agradeço.

À minha amiga Maially Mendonça que me foi apresentada por essa universidade e com quem dividi tantos momentos ao longo dessa jornada. Sua ideia de utilizar o Método Pomodoro para superar a inércia que permeava a execução desse trabalho foi fundamental para que ele de fato fosse iniciado. As chamadas de vídeo, as conversas e o apoio tão gentilmente ofertados fizeram toda a diferença.

À minha amiga Ana Cecília que tive o prazer de conhecer ainda na Universidade Federal de Campina Grande e com quem partilhei momentos únicos. O seu carinho e solicitude sempre me abraçaram de uma forma especial.

A minha amiga Geovana que desde os primeiros dias nessa universidade esteve me acompanhando e me proporcionando um grande suporte. Sua amizade muito agregou e foi um incentivo para que eu continuasse em meio a tantos desânimos. Sua participação nesse trabalho em específico é algo que preciso destacar pois foi primordial para que eu obtivesse o êxito.

A minha amiga Taísa que desde o início da minha vida escolar esteve me acompanhando e partilhando da evolução. Sua amizade muito faz a

diferença. Seus conselhos, seu carinho e seu apoio sempre me abraçam e me ajudam a seguir em frente.

A todos os colaboradores do Complexo Solar Fotovoltaico da cidade de Coremas, onde tive o prazer de estagiar durante o período de um ano, adquirindo grandes e valiosos ensinamentos que em muito contribuíram na minha formação. Agradeço a administração por liberar o acesso à obra para realização dos registros fotográficos e coletas de solo. A solicitude e prontidão da equipe muito cooperaram para o sucesso desse trabalho. Agradeço em especial a Donivan, que na execução desse trabalho me concedeu um grande apoio. Ao eletricitista Emanuel Vicente que não mediu esforços para ir a campo fazer coletas de solo e captação de coordenadas geográficas.

Sou imensamente grato também à Ana Moura, Fabiana Alves, Fabiano Lima, Luana Medeiros e Philipe Alexandre que durante a vigência do Estágio Supervisionado no Complexo Solar Fotovoltaico muito auxiliaram em minha formação, não apenas com conhecimentos técnicos, mas com experiências pessoais que marcaram e fizeram a diferença.

Ao Laboratório de Solos da Universidade Federal da Paraíba, em especial aos técnicos Sérgio e João, que me auxiliaram na realização de todos os ensaios laboratoriais que compõem esse trabalho. A presteza do técnico Sérgio precisa ser enaltecida, haja vista que foi deveras importante para a execução e sucesso desse trabalho.

A esta Universidade, seu corpo docente, direção e administração que tornaram possível este sonho, oportunizando a janela que hoje vislumbro.

Por fim, a todos que contribuíram de maneira direta ou indireta para meu crescimento pessoal e profissional, esse trabalho é fruto de todos vocês.

RESUMO

A energia solar emerge como uma solução diante das crises energéticas enfrentadas pelo Brasil. Complexos solares fotovoltaicos estão sendo construídos para enfrentar essa problemática, criando áreas de corte e aterro com taludes variados. No entanto, as precipitações frequentes causam erosão nessas encostas, ameaçando a estabilidade dos painéis solares. Soluções de proteção superficial foram aplicadas nos taludes, mas revelaram-se ineficazes devido à reincidência de erosões. Assim, esse estudo teve como objetivo realizar uma análise comparativa entre duas soluções de proteção superficial de taludes em um complexo solar fotovoltaico localizado nas cidades de Coremas e Pombal, sertão do estado da Paraíba. Cinco taludes foram selecionados para análise, sendo dois revestidos com biomanta, dois com enrocamento de pedras e um sem proteção superficial. A caracterização do solo revelou que todos os taludes apresentam areia do tipo SM, uma areia bem graduada e suscetível à erosão. Análises de estabilidade demonstraram que, quando saturados, todos os taludes apresentaram Fatores de Segurança menores que 1,2, indicando movimentações de massa ou rupturas. Ensaio de desagregação do solo revelaram alta erodibilidade, pois o solo se desintegrou rapidamente quando em contato com a água. A inclinação dos taludes foi apontada como um fator que pode afetar a eficácia de certos materiais geossintéticos, como a biomanta. A incompatibilidade do revestimento com as inclinações dos taludes pode ter contribuído para os problemas de erosão. Ficou comprovado que a estabilidade de taludes em complexos solares fotovoltaicos é afetada pela erodibilidade do solo, a saturação e a escolha de materiais de proteção superficial.

Palavras-chave: energia solar fotovoltaica; proteção de taludes; biomanta; erosão.

ABSTRACT

Solar energy emerges as a solution to the energy crises faced by Brazil. Photovoltaic solar complexes are being constructed to address this issue, creating cut and fill areas with varying slopes. However, frequent rainfall causes erosion on these slopes, threatening the stability of solar panels. Surface protection solutions have been applied to the slopes but proved ineffective due to recurring erosions. Therefore, this study aimed to conduct a comparative analysis between two surface protection solutions for slopes in a photovoltaic solar complex located in the cities of Coremas and Pombal, in the hinterland of the state of Paraíba. Five slopes were selected for analysis, two covered with biomat, two with stone riprap, and one without surface protection. Soil characterization revealed that all slopes have SM-type sand, well-graded sand susceptible to erosion. Stability analyses demonstrated that when saturated, all slopes showed Safety Factors below 1.2, indicating mass movements or failures. Soil disaggregation tests revealed high erodibility, as the soil disintegrated rapidly when in contact with water. The slope inclination was identified as a factor that can affect the effectiveness of certain geosynthetic materials, such as biomat. Incompatibility of the coating with slope inclinations may have contributed to erosion problems. It was proven that the stability of slopes in photovoltaic solar complexes is affected by soil erodibility, saturation, and the choice of surface protection materials.

Keywords: photovoltaic solar energy; slope protection; biomats; erosion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Erosões em face de talude sem proteção superficial.....	18
Figura 02 – Erosões em crista de talude sem proteção superficial	18
Figura 03 – Erosão em talude revestido com biomanta de fibra de coco	19
Figura 04 – Áreas aptas para instalação de usinas fotovoltaicas.....	23
Figura 05 – Seguidor solar de eixo horizontal	31
Figura 06 – Classificação da erosão	35
Figura 07 – Instalação de biomanta em talude	46
Figura 08 – Tipos e características dos grampos para fixação das biomantas	47
Figura 09 – Localização dos municípios de Coremas e Pombal.....	49
Figura 10 – Limites territoriais de Coremas e Pombal.....	50
Figura 11 – Acesso para o complexo solar pelo município de Coremas.....	51
Figura 12 – Acesso para o complexo solar pelo município de Pombal	51
Figura 13 – Compartimentação geológica do território brasileiro	54
Figura 14 – Mapa geológico regional	55
Figura 15 – Séries históricas e dados climáticos do município de Coremas....	57
Figura 16 – Séries históricas e dados climáticos do município de Pombal	57
Figura 17 – Seção transversal dos taludes	58
Figura 18 – Ponto de amostra deformada do Talude 01	61
Figura 19 – Ponto de amostra indeformada do Talude 05	61
Figura 20 – Destorroamento do solo	65
Figura 21 – Lavagem do solo retido na peneira nº 10.....	66
Figura 22 – Peneiramento do solo grosso.....	67
Figura 23 – Peneiramento do solo grosso.....	68
Figura 24 – Gráfico da Curva Granulométrica da AD 01.....	71
Figura 25 – Classificação da SUCS para Solos Grossos.....	72
Figura 26 – Homogeneização de amostra de solo ensaiada	74
Figura 27 – Tentativa de moldagem do corpo cilíndrico	75
Figura 28 – Homogeneização manual de amostra de solo	76
Figura 29 – Base com pedra britada	78
Figura 30 – Base com pedra britada	79
Figura 31 – Primeira etapa do Ensaio de Desagregação	79
Figura 32 – Segunda, terceira e quarta etapa do Ensaio de Desagregação....	80

Figura 33 – Resultado da primeira etapa do Ensaio de Desagregação	81
Figura 34 – Resultado da segunda etapa do Ensaio de Desagregação	81
Figura 35 – Resultado da terceira etapa do Ensaio de Desagregação	82
Figura 36 – Resultado da quarta etapa do Ensaio de Desagregação	83
Figura 37 – Fator de Segurança para o Talude 01 pelo Método de Bishop	86
Figura 38 – Fator de Segurança para o Talude 01 pelo Método de Fellenius..	87
Figura 39 – Fatores de Segurança mínimos para deslizamentos	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Fatores deflagradores dos movimentos das encostas	33
Tabela 02 – Principais funções dos vários tipos de geossintéticos	43
Tabela 03 – Registros e dados dos taludes	59
Tabela 04 – Resultados da umidade higroscópica.....	69
Tabela 05 – Massas secas das amostras totais e parciais	69
Tabela 06 – Resultado do peneiramento grosso da AD 01.....	70
Tabela 07 – Resultado do peneiramento fino da AD 01.....	71
Tabela 08 – Resumo das características dos métodos de equilíbrio limite	84
Tabela 09 – Peso específico de solos arenosos	85
Tabela 10 – Peso específico de solos arenosos	85
Tabela 11 – Fator de Segurança para os taludes 01 a 05	87

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Justificativa.....	17
2. OBJETIVOS	20
2.1. Objetivo Geral	20
2.2. Objetivos específicos	20
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
3.1. Panorama Geral da Energia Solar	21
3.1.1. O Uso da Energia Solar Fotovoltaica no Mundo.....	21
3.1.2. Potencial de energia solar fotovoltaica no Brasil	22
3.1.3. Etapas da Construção de um Complexo Solar Fotovoltaico.....	24
3.1.3.1. Levantamento Topográfico.....	24
3.1.3.2. Terraplenagem.....	26
3.1.3.3. Drenagem	28
3.1.3.4. Estruturas dos trackers e fixação dos módulos fotovoltaicos .	30
3.2. Mecanismos deflagradores de movimentos de massa em taludes	32
3.2.1. Precipitação.....	35
3.2.2. Declividade	36
3.2.3. Erosão Superficial.....	37
3.2.4. Erodibilidade	38
3.2.5. Vegetação	40
3.3. Geossintéticos.....	42
3.3.1. Função e Classificação dos Geossintéticos	43
3.3.2. Biomanta	44
3.3.3. Instalação em taludes.....	45
3.4. Enrocamento de pedras (<i>Rip Rap</i>).....	47
4. METODOLOGIA	49
4.1. Caracterização da Área de Estudo	49
4.1.1. Aspectos fisiográficos	52
4.1.2. Geologia	54
4.1.3. Condições climáticas	56
4.2. Objeto de estudo	57
4.3. Parâmetros geotécnicos.....	60
4.3.1. Coleta em campo.....	60
4.4. Definição do método de estudo.....	62

4.5. Simulação no Geostudio	62
5. RESULTADOS.....	64
5.1. Ensaaios de Laboratório	64
5.1.1. Análise Granulométrica do Solo: Ensaio de peneiramento.....	64
5.1.1.1. Definições	64
5.1.1.2. Execução	65
5.1.1.3. Resultados obtidos.....	68
5.1.2. Limites de Consistência.....	73
5.1.2.1. Definições	73
5.1.2.2. Execução	74
5.1.3. Ensaio de Desagregação (“ <i>Slaking Test</i> ”).....	77
5.1.3.1. Definições	77
5.1.3.2. Execução	78
5.1.3.3. Resultados obtidos.....	80
5.2. Análise da Estabilidade de Taludes	84
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
7. REFERÊNCIAS.....	92
8. APÊNDICES	97

1. INTRODUÇÃO

As preocupações relacionadas ao meio ambiente impulsionaram a expansão da busca por fontes de energia alternativas. Dentro desse leque de alternativas, a energia solar está recebendo considerável destaque. Esse tipo de energia diminui a necessidade de extensas redes de transmissão elétrica convencionais, não lança substâncias prejudiciais na atmosfera, não esgota os recursos naturais, reforça a autonomia energética do país ou região e contribui para uma oferta diversificada e segura de energia.

Nessa perspectiva, destaca-se a expansão da construção dos complexos solares fotovoltaicos, os quais permitem uma maior descentralização na geração de energia e que pode contribuir para uma maior segurança energética e resiliência do sistema elétrico.

No entanto, a escolha do local para instalar um complexo solar fotovoltaico nem sempre é em terreno plano. Muitas vezes, os locais disponíveis apresentam relevos, como colinas ou encostas, que podem exigir a criação de plataformas ou aterros para acomodar os painéis solares em terreno inclinado.

Devido a comum ocorrência de desníveis no relevo, as movimentações de terra acabam sendo necessárias em obras dessa natureza para garantir a melhor disposição dos painéis solares. Nesse processo, a formação de taludes acaba sendo inevitável, uma vez que as atividades de corte e aterro decorrentes da terraplanagem desencadeiam naturalmente regiões inclinadas entre as plataformas.

Daí, em taludes de corte ou aterro existe um considerável potencial para o desencadeamento de fenômenos erosivos, especialmente quando suas superfícies estão expostas. Nesse contexto, é viável reduzir ou prevenir tais processos por meio da instalação de proteções na face dos taludes.

A falta de controle em processos erosivos pode resultar em sérios transtornos para estruturas construtivas e para o ambiente natural em si. Geralmente, a correção dos estragos causados pela erosão implica em desafios significativo e despesas substanciais.

Fernandes et al. (2009) comenta que nações de clima tropical como o Brasil precisam aprimorar suas abordagens no que diz respeito à proteção de encostas. Assim, é fundamental realizar investigações e análises para aprimorar o uso e a eficácia dos métodos de proteção superficial de taludes para assegurar a segurança e integridade das estruturas que compõem o complexo solar fotovoltaico.

Nesse contexto, como ferramenta para avaliar a estabilidade de taludes foi realizada uma pesquisa onde se executou ensaios de caracterização do solo, tais como Análise Granulométrica, Limites de Consistência e Sedimentação com amostras deformadas coletadas no campo de estudo.

Realizou-se também o ensaio de Cisalhamento Direto com amostras indeformadas a fim de se obter parâmetros geotécnicos para posteriores análises de estabilidade de taludes. Por fim, executou-se ainda o Ensaio de Desagregação do Solo, ou "*Slaking Test*", com a finalidade de compreender a capacidade estrutural do solo quando exposto à água.

Assim, com o desenvolvimento do presente trabalho deseja-se promover uma contextualização sobre o assunto a partir de evidências aliadas a análises geotécnicas, visando reunir dados científicos que comprovem a necessidade de soluções mais eficazes na proteção superficial de taludes nos complexos solares fotovoltaicos.

1.1. Justificativa

Em meio às crises decorrentes da falta de energia elétrica devido aos baixos níveis dos reservatórios de água que o Brasil enfrentou na década de 2000, conforme aponta Abreu (2002), a energia solar despontou como uma solução bastante conveniente para tão grave problemática. Nessa perspectiva, destaca-se a construção de um grande complexo solar fotovoltaico na cidade de Coremas, interior do estado da Paraíba.

Daí, na construção de empreendimentos do tipo, regiões de corte e aterro são formadas durante o processo de terraplanagem e a formação de taludes com as mais variadas alturas e inclinações é bastante comum. No entanto, devido ao peculiar regime pluviométrico do sertão do estado da Paraíba,

em que fortes chuvas são concentradas numa determinada época do ano, eventos de erosão nos taludes ocorrem com frequência e acarretam numa grave problemática que pode colocar em risco a estabilidade das estruturas que sustentam os painéis solares.

Em visitas a obra após eventos de chuva, várias situações puderam ser evidenciadas em taludes sem proteção superficial, tal como é possível observar nas Figuras 01 e 02:

Figura 01 – Erosões em face de talude sem proteção superficial



Fonte: Autoria própria

Figura 02 – Erosões em crista de talude sem proteção superficial



Fonte: Autoria própria

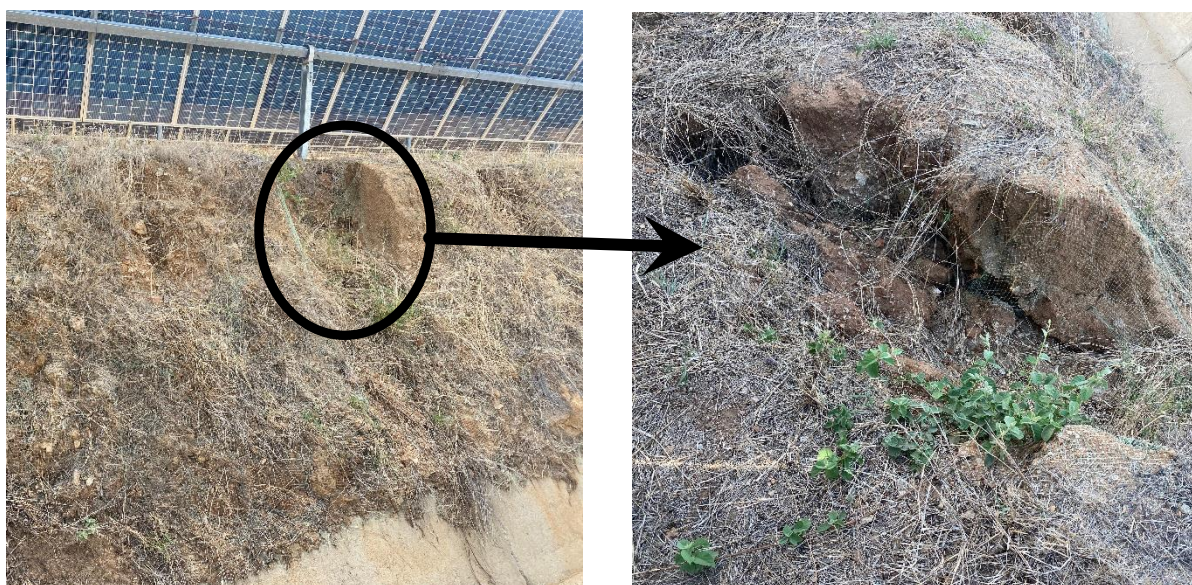
Devido à geologia local, durante a atividade de terraplenagem, por diversas vezes as máquinas se depararam com materiais rochosos, que segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) são classificados como os materiais de terceira categoria. Dado isso, a solução para o desmonte das rochas foi a detonação com explosivos.

Como houve diversos episódios de detonações, a obra ficou com um estoque considerável de rochas, que além de ser aproveitado na execução da drenagem, foi utilizado também no revestimento da face dos taludes através da técnica do enrocamento ou *rip-rap*. No entanto, nos últimos estágios da obra, a demanda por rochas acabou sendo superior ao estoque disponível e a adoção de outra solução foi necessária.

Nessa perspectiva, despontou-se a solução da biomanta com fibras de coco, a qual foi disposta sobre a face de alguns taludes e semeado o capim, compondo uma solução muito válida na proteção de encostas contra erosões. Em comparação ao enrocamento com rochas, a biomanta com fibras de coco acaba sendo muito menos onerosa, além de ser mais sustentável, tendo em vista os impactos que a extração das pedras pode causar.

Entretanto, foi observado que em alguns pontos a solução da biomanta com fibras de coco não foi tão eficaz, haja vista os pontos expressivos de erosão desencadeados, assim como mostra a Figura 03.

Figura 03 – Erosão em talude revestido com biomanta de fibra de coco



Fonte: Autoria própria

Além disso, foi observado que alguns dos taludes revestidos com pedras de mão lançadas também apresentaram erosões, as quais não foram tão visíveis devido à presença das rochas na face do talude, mas que formaram fendas que podem comprometer a estabilidade do talude.

Diante do exposto, justifica-se a necessidade da realização de um estudo para comparar as alternativas apresentadas de proteção superficial de encostas, a saber, o enrocamento com pedras de mão lançadas e a biomanta de fibra de coco. É pertinente analisar em que configuração de solo, altura e inclinação do talude cada uma dessas soluções é mais ou menos eficaz.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Comparar a eficiência entre a biomanta e o enrocamento de pedras utilizados na proteção superficial de taludes de um complexo solar fotovoltaico, fazendo-se uma análise de estabilidade, para concluir qual a solução mais viável em termos funcionais.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar os taludes de aterro de um complexo solar fotovoltaico;
- Descrever os materiais utilizados no revestimento dos taludes;
- Realizar ensaios de campo e em laboratório para se determinar os parâmetros geotécnicos do solo na área de estudo;
- Comparar a eficiência de cada alternativa de revestimento de talude.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Panorama Geral da Energia Solar

3.1.1. O Uso da Energia Solar Fotovoltaica no Mundo

A utilização da energia gerada pelo Sol, fonte de calor e luz inesgotável na escala terrestres de tempo, é atualmente uma das alternativas energéticas mais promissoras para a humanidade enfrentar os desafios do novo milênio. É o Sol quem gera praticamente todas as outras fontes de energia. Por isso, pode-se dizer que as fontes de energia são, em última instância, derivadas da energia do Sol (NASCIMENTO, 2015).

Daí, Silva (2018) comenta que além da radiação solar, é necessário valer-se de outros recursos para que transformação de luz em energia seja viável. Existem alguns outros componentes, a exemplo das placas fotovoltaicas, inversores solares e cabos, necessários no processo do ciclo de transformação de energia. O papel destes módulos é justamente transformar de forma direta a energia radiante em energia elétrica, a qual pode ser utilizada em tempo real, ou mesmo armazenada em baterias ou geradores.

Arelada à energia solar, estão as questões ambientais do mundo moderno que cada vez mais impõem à sociedade a necessidade de se utilizar os recursos naturais de forma consciente e sustentável. Daí, Nascimento (2015) destaca justamente que a produção da energia elétrica vem ganhando proporções extremas perante as políticas mundiais, onde os governos dos países têm se esforçado para promover um desenvolvimento industrial no setor de energia.

A WEO (2012) comenta que a eficiência energética ocasiona ganhos econômicos consideráveis, onde países como a China, Índia, Estados Unidos e na Europa já passaram a observar. No entanto, os investimentos em tecnologia acabam sendo necessários; além da criação de leis, normas, tarifas e até mesmo incentivos. É por esse motivo que a redução efetiva na emissão de gases poluentes e outras medidas ambientais vêm sendo determinadas pelos mais diversos órgãos em torno do mundo.

Na Europa, a Alemanha e a Itália lideram a produção de energia solar fotovoltaica. Para se ter uma ideia, a Alemanha adicionou uma produção fotovoltaica no ano de 2010 que foi superior ao que o mundo todo produziu no mesmo ano, segundo REN (2011).

Entretanto, a edição atualizada do ano de 2022 do Relatório de Energias Renováveis menciona que a China tem sido o maior produtor de energia solar fotovoltaica do mundo. O país investiu massivamente em projetos de energia solar e incentivou o uso dessa fonte para diversificar sua matriz energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

Na sequência temos os Estados Unidos como o segundo país do mundo com maior matriz energética no setor. Vários estados americanos têm promovido políticas de energia limpa e incentivos para aumentar a adoção de energia solar. A Índia também tem visto um crescimento significativo em sua capacidade de energia solar nos últimos anos (REN, 2021).

3.1.2. Potencial de energia solar fotovoltaica no Brasil

O centro de referências para energia solar do Brasil é claro ao afirmar que o Sol fornece para a atmosfera terrestre $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia por ano. É um valor bastante expressivo porque equivale a 10.000 vezes o consumo energético anual no mundo. Com isso, ressalta-se que a radiação solar se configura como uma fonte inesgotável de energia (SILVA, 2018).

Júnior (2020) comenta que foi em 1994 no Brasil o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios, o PRODEEM, o qual deu início ao programa solar brasileiro através da obtenção dos sistemas fotovoltaicos. Foram instalados inicialmente 5 MWp em cerca de 7.000 comunidades do país.

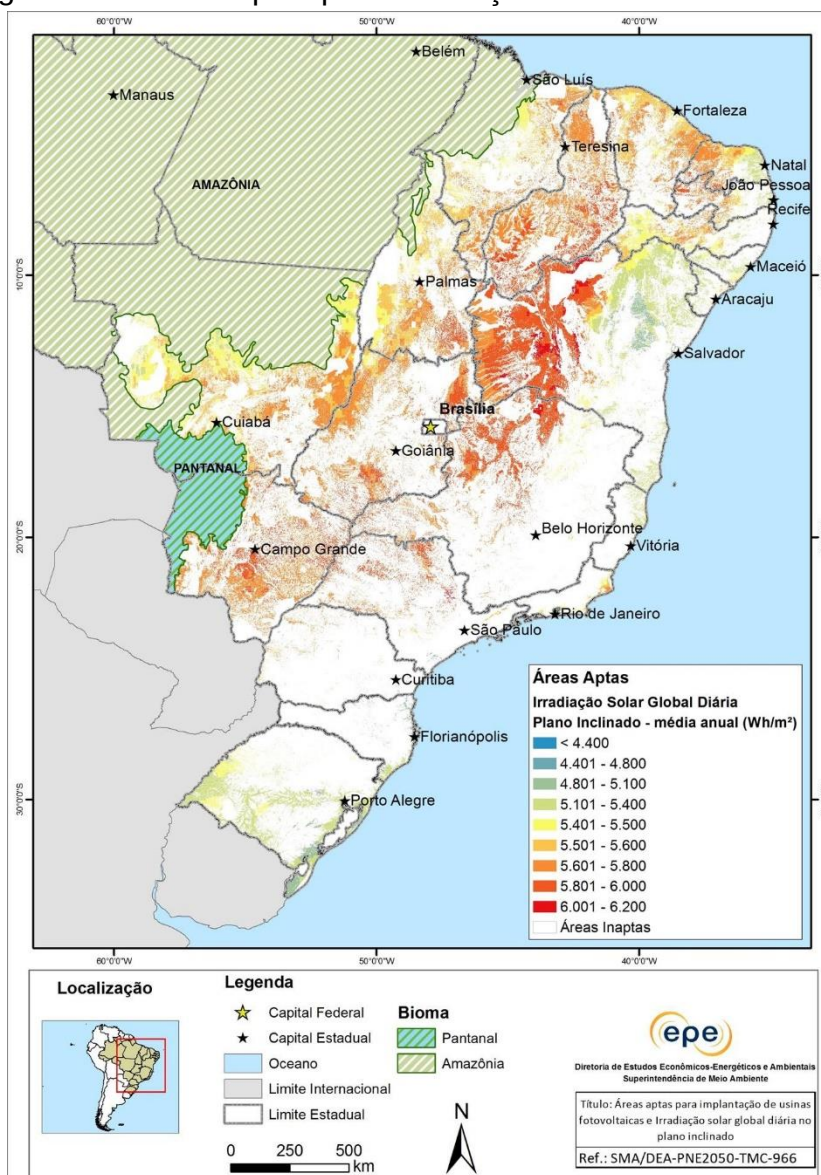
No entanto, a utilização da energia solar fotovoltaica ficou bastante limitada no início da sua implantação devido aos altos custos com equipamentos e a própria instalação. Era uma tecnologia nova até então e a falta de conhecimento e confiança no sistema também dificultou o acesso de muitos, fazendo com que o abastecimento ficasse voltado para comunidades isoladas.

Mas Nascimento (2015) tem muitas expectativas em relação à matriz fotovoltaica brasileira, pois afirma que:

[...] a matriz fotovoltaica brasileira tende a crescer, pois há o contínuo barateamento dos equipamentos, o crescente interesse de investidores, o surgimento de novas tecnologias e uma tendência à solidificação das políticas de incentivo, que já são aplicadas mundo afora. (pg. 63)

Nessa perspectiva, previamente à instalação do coletor do sistema solar de geração de energia, vale destacar a importância da realização de um estudo investigativo do nível de radiação solar que incide no local, a fim de se garantir a eficiência esperada pelo sistema (JÚNIOR, 2020). A Figura 04 apresenta a irradiação solar diária de grande parte do Brasil.

Figura 04 – Áreas aptas para instalação de usinas fotovoltaicas



Fonte: Plano Nacional de Energia (2020)

Nessa perspectiva, o Plano Nacional de Energia 2050 reproduz dados do Atlas Solarimétrico do Brasil e assinala que essa radiação varia de 4.400 a 6.200 Wh/m² (Watt por hora por metro quadrado), em um plano inclinado.

Estudos apresentados pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2019) comprovam que os estados brasileiros mais promissores no ramo da energia solar são aqueles que detêm os maiores índices de radiação solar. São eles: Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Piauí, Bahia, São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Tocantins.

Atualmente, a região Nordeste ainda obtém sua energia elétrica principalmente de recursos hídricos, com destaque para o rio São Francisco como sua principal fonte de abastecimento. No entanto, informações fornecidas pelo Operador Nacional do Sistema revelam que no período de 2012 a 2017, a produção de energia hidrelétrica proveniente do rio São Francisco sofreu uma queda de 71% (ONS, 2018).

Freire (2018) afirma que das 154 hidrelétricas em operação, 69 usinas estão apoiadas por reservatórios, porém 85 destas não dispõem do mesmo privilégio, tendo sua funcionalidade afetada pelos períodos anuais de estiagem.

3.1.3. Etapas da Construção de um Complexo Solar Fotovoltaico

3.1.3.1. Levantamento Topográfico

O levantamento topográfico desempenha um papel fundamental na concepção, planejamento e construção de complexos solares fotovoltaicos. Essa etapa essencial permite a obtenção de dados precisos sobre o terreno, permitindo uma análise detalhada para otimizar a disposição dos painéis solares, a localização de estruturas de suporte e outros componentes do sistema (RIMA, 2019).

Assim, o principal objetivo do levantamento topográfico em um complexo solar fotovoltaico é obter um mapeamento preciso e detalhado do terreno. Cardoso (2020) comenta que de uma forma geral, isso envolve a coleta de informações sobre as variações de elevação, inclinação do solo, obstáculos naturais ou artificiais e outros elementos relevantes para a construção e operação do sistema. Daí, é com base nesses dados que os engenheiros e

projetistas podem tomar decisões informadas sobre a melhor disposição dos painéis solares, trilhos de suporte, cabos e outros componentes.

Nessa perspectiva, existem diversos métodos utilizados para realizar levantamentos topográficos em complexos solares fotovoltaicos. Entre os mais comuns, destaca-se o levantamento com Estação Total que, segundo Cardoso (2020) é realizado através de instrumentos de alta precisão como a estação total, onde os topógrafos realizam medições angulares e de distância para determinar a elevação e as características do terreno.

Outro método de levantamento topográfico muito utilizado é o levantamento GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite), no qual se utilizam receptores que permitem obter coordenadas geográficas precisas, auxiliando na criação de modelos tridimensionais do terreno (PAZ, 2021).

Além disso, ainda se pode citar como método de levantamento topográfico a varredura a laser (LiDAR), em que se utilizam pulsos de laser para mapear a superfície do terreno em alta resolução, fornecendo dados detalhados de elevação. Sobre esse método, Gehlen e Werly (2018) discorrem que:

[...] a varredura a laser tem como fonte sensores ativos que possibilitam operações a noite, emitindo um feixe de pulsos laser normalmente no espectro de onda do infravermelho. Nesse sistema, não há a necessidade de refletores, pois as medidas são efetuadas tendo como alvo uma feição ou objeto escaneado, gerando automaticamente uma densa nuvem de pontos com coordenadas 3D. (pg. 55)

Em se tratando de levantamento topográfico no mundo moderno e tecnológico atual, uma ferramenta muito útil e cada vez mais acessível é o drone. O mesmo se configura como uma aeronave não tripulada e equipada com câmeras ou sensores que podem capturar imagens aéreas de alta qualidade, que são processadas para gerar modelos topográficos. A utilização do drone pode resultar em uma experiência aprimorada, pois ele é capaz de criar diversos tipos de documentos, como imagens e relatórios. Isso permite a visualização de certos detalhes sem exigir a presença física no local (MARIANO et al., 2022).

Então, as informações coletadas por meio do levantamento topográfico são cruciais para diversos aspectos do projeto e construção de complexos solares fotovoltaicos, uma vez que com dados precisos sobre o terreno, os projetistas podem determinar as melhores posições para os painéis solares,

maximizando a exposição à luz solar e otimizando a geração de energia (RAMALHO, 2023).

Ademais, as informações de elevação e inclinação auxiliam no dimensionamento das estruturas de suporte dos painéis, garantindo estabilidade e segurança. E a topografia ainda influencia o escoamento da água da chuva e a drenagem do terreno, sendo essencial para evitar problemas relacionados à erosão e acumulação de água (RIMA, 2019).

3.1.3.2. Terraplenagem

A terraplenagem corresponde a um conjunto de operações que envolvem a movimentação e ajuste do solo para criar uma superfície nivelada e adequada para construção civil. Na implantação de um complexo solar fotovoltaico, é a etapa inicial e tem fundamental importância.

O terreno deve ser nivelado e preparado para receber os componentes do sistema solar, como painéis solares, estruturas de suporte e sistema de cabeamento. A qualidade do nivelamento afeta diretamente a eficiência do sistema, uma vez que terrenos irregulares podem levar a sombreamento entre os painéis, reduzindo a produção de energia (RAMALHO, 2023).

Durante a fase da terraplanagem, a inclinação dos painéis deve ser cuidadosamente planejada para otimizar a exposição aos raios solares ao longo do dia e ao longo das diferentes estações do ano. Segundo Vilela (2014), modelos computacionais e análises topográficas são frequentemente usados para determinar a inclinação ideal em relação à latitude e à orientação do local.

Assim, avanços tecnológicos têm influenciado positivamente a forma como a terraplanagem é realizada em projetos de energia solar. Sistemas de escavação a laser e equipamentos de nivelamento automatizados ajudam a garantir precisão e uniformidade na preparação do terreno. Além disso, o uso de softwares de modelagem tridimensional permite uma visualização precisa do terreno antes e depois da terraplanagem (RABELO; SILVA; SILVA, 2020).

Uma vez finalizada a fase de projeto e planejamento da terraplenagem, parte-se para execução em campo do processo que deve ser iniciado pela limpeza do terreno, onde é recomendado fazer a remoção da vegetação, rochas

soltas, detritos e outros obstáculos que possam interferir no nivelamento do terreno (GALEGO; DE MARCO, 2021).

Quando necessário, o solo deve ser escavado para atingir o nível desejado, removendo possíveis excessos. Esse processo é denominado de corte e é frequentemente usado para nivelar áreas inclinadas. Paralelamente ao corte, existe o aterro que envolve o acréscimo de solo para elevar áreas mais baixas ou preencher depressões. Por isso é criada uma superfície nivelada e uniforme (GALEGO; DE MARCO, 2021).

Durante as atividades de escavação e nivelamento, é comum se deparar com uma variedade de materiais rochosos e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) apresenta uma classificação simplificada para esses materiais, composta por três categorias e que requerem diferentes tipos de escavação, na Norma 106/2009.

A primeira categoria de materiais engloba solos em geral, sejam ele residuais ou sedimentares, juntamente com seixos que podem ou não ser rolados, desde que tenham um diâmetro máximo inferior a 0,15m, independentemente do nível de umidade presente.

A segunda categoria diz respeito aos materiais com menor resistência ao desmonte mecânico em comparação com a rocha inalterada. A extração desses materiais exige a combinação de métodos que requerem o uso do maior equipamento de escarificação estipulado contratualmente. O processo de extração pode, eventualmente, envolver o uso de explosivos ou métodos manuais adequados.

Já a terceira categoria inclui materiais com resistência ao desmonte mecânico semelhante à rocha inalterada, bem como blocos de rocha com diâmetro médio superior a 1,00m ou volume igual ou superior a 2m³. A extração e redução desses materiais para facilitar o carregamento são realizadas por meio do uso contínuo de explosivos.

Stefani (2019) sugere, inclusive, a utilização dos materiais provenientes dos desmontes de rocha em enrocamento de encostas devido à sua resistência natural e capacidade de fornecer estabilidade. Eles podem ser empilhados de

maneira organizada e segura para formar uma estrutura que protege a encosta contra forças externas, como chuvas intensas e movimentos do solo.

Uma vez finalizadas as etapas de corte e aterro, o processo da terraplanagem é continuado com a etapa da compactação, em que o solo é estabelecido em camadas utilizando-se equipamentos específicos, como rolos compactadores, para aumentar a densidade e resistência do solo. Isso ajuda a evitar afundamentos futuros. Dependendo da configuração do terreno, o projeto pode prever também a instalação de sistemas de drenagem, essenciais para evitar o acúmulo de água, o qual pode comprometer a estabilidade do solo e das estruturas construídas sobre ele (DNIT, 2009).

Por fim, têm-se as etapas de nivelamento e acabamento em que a superfície é nivelada de acordo com as especificações do projeto. Isso envolve ajustes finos para garantir uma superfície uniforme e plana. Vale destacar que durante todo o processo é importante realizar verificações de qualidade para garantir que a terraplanagem atenda aos padrões e requisitos estabelecidos (GALEGO; DE MARCO, 2021).

3.1.3.3. Drenagem

A relevância da água no contexto atual para todas as formas de vida é uma preocupação global. Além de representar um dos recursos minerais mais preciosos, ela desempenha diversas funções essenciais para o progresso. No entanto, apesar de suas vantagens, a água pode se tornar um elemento complicador em certas situações, como na área da construção civil, caso não seja utilizada, protegida e drenada de maneira adequada, evitando impactos no meio ambiente (QUEIROZ FILHO, 2019).

Nesse contexto, a drenagem é tida como um sistema convencional de escoamento que tem como propósito possibilitar a rápida e eficiente remoção das águas pluviais em direção a jusante do ponto de captação. Isso tem o efeito de minimizar a exposição e os potenciais perigos de inundações que têm o potencial de prejudicar diretamente a longevidade das construções (PEREIRA, 2019).

Em se tratando de drenagem em taludes, Dutra (2013) afirma que:

As obras de drenagem têm por finalidade a captação e o direcionamento das águas do escoamento superficial, assim como a retirada de parte da água de percolação do maciço. Podem ser utilizadas como o único recurso para estabilizar o maciço ou como um recurso adicional das obras de estabilidade do talude associada a contenções, retaludamento ou proteções diversas. (pg. 21)

Sendo assim, para determinar as dimensões adequadas dos dispositivos de drenagem, é necessário conduzir uma análise in loco dos registros pluviométricos, do tamanho da área de contribuição da bacia e das propriedades dos materiais pelos quais as águas a serem drenadas fluem (QUEIROZ FILHO, 2019).

Com os complexos solares fotovoltaicos não é diferente, o sistema de drenagem desempenha um papel fundamental em sua operação. A instalação de sistemas de drenagem adequados é crucial para evitar acúmulos de água que podem comprometer a integridade das estruturas de suporte dos painéis solares e afetar a produção de energia (PRESERV, 2019).

O fato é que a água acumulada pode levar à corrosão das estruturas metálicas, erosão do solo e danos aos cabos elétricos. Além disso, o excesso de água nas superfícies dos painéis solares reduz a eficiência da geração de energia, pois interfere na captação da luz solar. Portanto, a implementação de um sistema de drenagem eficiente é essencial para manter a operação confiável e a longevidade dos complexos solares (FERREIRA, 2014).

Por isso, ao projetar sistemas de drenagem para complexos solares fotovoltaicos, o Estudo Ambiental da Preserv Consultoria Ambiental (2019) especifica que algumas práticas devem ser consideradas:

1. Avaliação da Topografia: Realizar uma análise detalhada da topografia do terreno para identificar áreas com risco de acúmulo de água e determinar os pontos mais adequados para o escoamento;
2. Dimensionamento Preciso: Dimensionar adequadamente os canais de drenagem e dispositivos de captação com base nas condições de precipitação local e nas áreas de captação de água;
3. Uso de Materiais Duráveis: Optar por materiais resistentes à corrosão, como aço galvanizado ou polímeros de alta qualidade, para garantir a longevidade das estruturas de drenagem;

4. Sistema de Monitoramento: Implementar sistemas de monitoramento para acompanhar o fluxo de água e identificar possíveis problemas de drenagem em tempo real;
5. Integração com Paisagem: Projetar o sistema de drenagem de forma a se integrar harmoniosamente à paisagem circundante, minimizando o impacto visual.

3.1.3.4. Estruturas dos trackers e fixação dos módulos fotovoltaicos

Os complexos solares fotovoltaicos consistem em grandes campos de módulos fotovoltaicos dispostos em uma área extensa. Para maximizar a captação de energia solar, é fundamental que esses módulos sigam o movimento do sol durante o dia. É aí que entram os trackers solares. A principal função desses trackers é ajustar a inclinação e a orientação dos módulos fotovoltaicos para manter a luz solar incidente perpendicular às células solares, aumentando assim a eficiência do sistema (ITAMARO, 2019).

Existem vários tipos de trackers solares utilizados em complexos solares fotovoltaicos, cada um com suas características específicas. Rocha e Assunção (2020) falam sobre a existência dos trackers polares de eixo único, trackers de eixo horizontal, trackers de eixo vertical e tracker de dois eixos. Dentre esses, os mais utilizados nos complexos solares fotovoltaicos são os trackers de eixo horizontal.

Os trackers de eixo horizontal têm um eixo de rotação que permite aos módulos fotovoltaicos moverem-se de leste a oeste ao longo do dia, seguindo o movimento aparente do sol no céu. Isso otimiza a captação de energia solar durante as horas de luz solar. A implementação deste tipo de sistema pode ser feita através de vigas paralelas ao eixo polar norte-sul, apoiadas sobre suportes (MORAES, 2012).

As estruturas de montagem no solo são frequentemente utilizadas em complexos solares e além das vigas de torção, que possibilitam a movimentação direta dos módulos, existem as estacas, as quais podem ser de aço ou concreto. Essas estacas são cravadas no solo para ancorar os módulos. Elas oferecem estabilidade em terrenos planos ou levemente inclinados (ITAMARO, 2019).

A Figura 05 apresenta um seguidor solar finalizado onde se é possível observar as estruturas horizontais, que são as vigas de torção, e as estruturas verticais ou estacas.

Figura 05 – Seguidor solar de eixo horizontal



Fonte: Autoria própria

Rocha e Assunção (2020) comentam também que a utilização de trackers solares em um complexo solar fotovoltaico oferece diversos benefícios, dentre os quais:

1. Aumento na eficiência: Os trackers solares permitem que os módulos fotovoltaicos capturem uma quantidade maior de luz solar ao longo do dia, aumentando a eficiência geral do sistema;
2. Produção de energia mais consistente: com os trackers, a produção de energia é mais consistente ao longo do dia, reduzindo os picos e vales na geração de eletricidade;
3. Melhoria da rentabilidade: a maior produção de energia resultante do uso de trackers solares pode aumentar a rentabilidade do complexo solar fotovoltaico;
4. Redução das emissões de CO₂: Ao maximizar a geração de energia solar, os complexos solares com trackers contribuem para a redução das

emissões de dióxido de carbono, ajudando a mitigar as mudanças climáticas.

Quanto à fixação dos módulos fotovoltaicos, etapa final da obra de construção e montagem de um complexo solar fotovoltaico, é considerada um componente crítico para garantir a estabilidade, segurança e eficiência do sistema. É essencial para garantir que os módulos permaneçam seguros e estáveis, mesmo em condições adversas, como ventos fortes (FERREIRA, 2014).

Além disso, a fixação dos módulos fotovoltaicos é essencial para a eficiência do sistema por possibilitar a inclinação e a orientação correta, maximizando assim a captação da energia solar durante todo o dia. Quando estão bem fixos, os módulos também ficam isentos de danos e a vida útil dos mesmos pode ser prolongada. Vale destacar ainda que se deve obedecer uma distância segura entre os painéis e estruturas ou vegetação que podem prejudicar os equipamentos (SILVA, 2018).

3.2. Mecanismos deflagradores de movimentos de massa em taludes

De modo geral, taludes são definidos como todas as superfícies de um maciço de solo ou rocha que exibem uma certa inclinação em relação ao plano horizontal. Conforme descrito por Caputo (1988), essas inclinações podem ser encontradas em configurações naturais, como encostas, ou em configurações artificiais resultantes de escavações ou aterros.

Os taludes naturais surgem ao longo do tempo devido à ação de fatores como intempéries e movimento de marés, conforme descrito por Passos (2018). Esses taludes naturais podem consistir em solo residual, solo coluvionar ou rocha, ou uma combinação desses materiais. Quanto a sua forma, eles podem ter uma superfície plana ou curva. O solo residual permanece no local onde se formou devido ao intemperismo da rocha original, enquanto o solo coluvionar é caracterizado por sua grande variedade, pois é criado pelo transporte de fragmentos que, principalmente devido à ação da gravidade, se acumulam em um depósito de materiais.

Por outro lado, os taludes construídos são originados a partir da realização de aterros ou cortes em terrenos naturais. Esse tipo de talude pode ser encontrado em projetos como barragens e infraestruturas de transporte terrestres, como estradas e até obras de terraplenagem. (TAVARES, 2019).

Nessa perspectiva, os movimentos gravitacionais de massa em talude resultam de uma série de eventos desencadeados por várias possíveis causas, levando a consequências que resultam na remoção de solo ou rocha quando a massa atinge um estado de instabilidade. Conforme explicado por Silva (2018), a ruptura acontece quando as demandas superam a capacidade de resistência ao cisalhamento dos materiais envolvidos.

Heidemann (2015) comenta que um mecanismo deflagrador representa um estímulo externo que, quando combinado com características naturais da encosta, cria a condição fundamental para desencadear uma ruptura. Nesse contexto, esses mecanismos deflagradores podem ser categorizados em dois conjuntos distintos, conforme apresenta a Tabela 01.

Tabela 01 – Fatores deflagradores dos movimentos das encostas

AÇÃO	FATORES	FENÔMENOS GEOLÓGICOS/ANTRÓPICOS
Aumento da solicitação	Remoção de massa (lateral ou da base)	• Erosão, escorregamentos • Cortes
	Sobrecarga	• Peso da água de chuva • Depósito de material • Peso da vegetação • Construção de estruturas, aterros, etc.
	Solicitações dinâmicas	• Terremotos, ondas, etc. • Explosões, tráfego, sismos induzidos
	Pressões laterais	• Água em trincas, congelamento, material expansivo
Redução da resistência	Características inerentes ao material (textura, geometria, estruturas, etc.)	• Características geomecânicas do material, tensões iniciais
	Mudanças ou fatores variáveis	• Redução da coesão, ângulo de atrito • Elevação do nível d'água • Aumento da umidade/Redução da sucção

Fonte: Gersovich (2012), adaptado de Varnes (1978)

Assim, os movimentos de massas e rochas são influenciados por elementos desestabilizadores que aceleram a ocorrência desses movimentos. Segundo Guidicini e Nieble (1983), esses elementos desestabilizadores podem ser definidos como causas e agentes, onde a causa se refere a maneira como um determinado agente atua. As causas dos movimentos de massa representam justificativas para a ocorrência de um movimento específico em um determinado local e momento, abrangendo uma variedade de fatores, como geológicos, morfológicos, físicos e humanos.

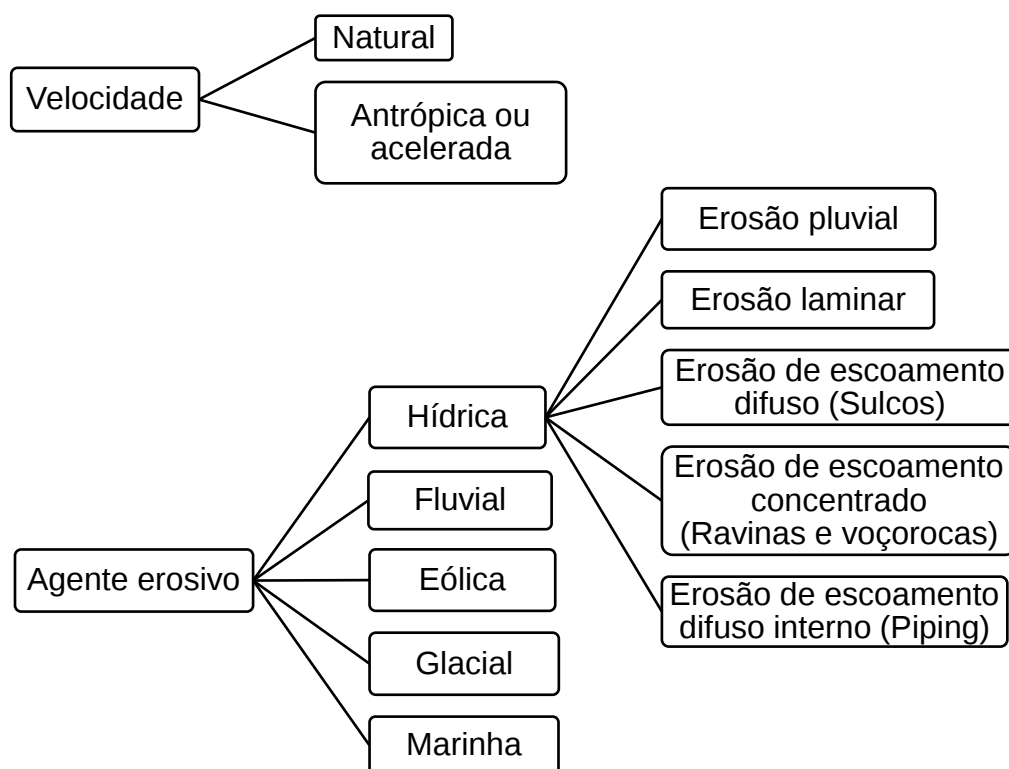
Portanto, ao examinar um deslizamento de terra, é importante notar que, na maioria dos casos, não há agentes ou causas desencadeadoras atuando de forma isolada no evento, mas sim uma combinação deles. A ocorrência do deslizamento ocorre, portanto, após a interação simultânea de todos esses fatores. Então, identificar os elementos responsáveis pelo movimento, embora nem sempre seja suficiente para eliminar a causa, pode ajudar a mitigar seus efeitos por meio da implementação de medidas corretivas e preventivas (PATRIOTA, 2021).

Em se tratando dos complexos solares fotovoltaicos, a estabilidade dos taludes é fundamental para a segurança operacional e a eficácia desses empreendimentos. Daí, compreender os mecanismos deflagradores de movimentos de massa e implementar medidas de mitigação apropriadas é essencial para garantir a sustentabilidade e a longevidade dessas instalações.

Nessa perspectiva, a classificação dos agentes erosivos ajuda a identificar as principais causas da erosão em uma determinada área. Isso permite que os gestores de terras e cientistas compreendam melhor os fatores que contribuem para a erosão e desenvolvam estratégias de controle adequadas.

Ademais, a classificação dos agentes erosivos ajuda a avaliar o risco de erosão em uma área específica, permitindo que os tomadores de decisão priorizem a implementação de medidas de controle em locais de maior risco. A Figura 06 apresenta a classificação da erosão quanto aos agentes que a desencadeia.

Figura 06 – Classificação da erosão



Fonte: Soares (2023)

3.2.1. Precipitação

O fluxo de água das chuvas superficialmente está ligado diretamente à quantidade de água que se infiltra no solo, e o processo de erosão superficial é caracterizado pela remoção uniforme do solo ao longo de uma inclinação. Dependendo da inclinação do terreno, sulcos podem se formar, e com o tempo, isso pode levar a outro tipo de erosão, dependendo do estágio de desenvolvimento (PATRIOTA, 2021).

Conforme indicado por Melo (2020), a perda de solo devido à erosão provocada pela chuva resulta de uma combinação entre o desprendimento do solo e seu transporte imediato, sendo que os principais fatores responsáveis nesse processo são o impacto das gotas de chuva e o movimento superficial da água. Quando a intensidade da precipitação ultrapassa a capacidade de absorção atual do solo desprotegido, o excesso de água segue pela encosta como um fluxo superficial, transportando consigo as partículas de solo que se desprendem tanto devido ao impacto das gotas de chuva quanto devido ao próprio movimento da água.

Em condições de solo seco, a perda de material é mais significativa, e à medida que a quantidade de água no solo aumenta, sua capacidade de resistência ao cisalhamento diminui, tornando-o mais suscetível ao escoamento da água. Além disso, é importante notar que a influência da sucção na resistência ao cisalhamento diminui à medida que o teor de umidade do solo se reduz (CAMPOS E MOTTA, 2015).

A formação de um sulco no solo devido ao escoamento superficial resulta na perda de água e solo, criando assim o início de um canal que transporta as partículas já desagregadas e em movimento. Nesse cenário, a energia do fluxo faz com que o transporte de agregados seja mais acentuado (HEIDEMANN, 2015).

3.2.2. Declividade

Tanus (2018) discute como a inclinação e o comprimento da rampa do talude estão intimamente relacionados à velocidade de escoamento e à quantidade de material transportado. O comprimento da rampa é definido como a distância entre o ponto de início do fluxo, no ponto mais alto, até o ponto onde o material transportado se deposita na parte inferior. Contudo, é importante destacar que o aumento do comprimento do declive está associado a um aumento na perda de solo.

No estudo que investiga a vulnerabilidade dos solos à erosão nas proximidades do reservatório da Usina Hidrelétrica de Tombos, localizada em Minas Gerais, Calderano Filho et al. (2014) destacam a relevância do relevo no processo erosivo. Eles apontam que a inclinação do terreno desempenha um papel crucial na capacidade de infiltração da água no solo, observando que em áreas de terreno plano não ocorre o deslocamento e transporte de partículas de diferentes tipos de solo.

Conforme Silva (2018), o aumento da inclinação da superfície resulta em perda de solo devido a diversos fatores. Isso inclui o aumento da desagregação das partículas de solo devido ao ângulo de impacto mais pronunciado das gotas de chuva, a maior facilidade de movimentação das partículas devido à influência da gravidade e o aumento na velocidade do escoamento superficial. Quando a superfície do solo possui uma inclinação reduzida, o escoamento superficial

ocorre com baixa velocidade, resultando em uma restrição do transporte de sedimentos, que fica limitado à quantidade de água escoando.

Nos estudos conduzidos por Quansah (1985), utilizando um simulador de chuva, foram examinadas várias inclinações do terreno. Constatou-se que em inclinações inferiores a 10%, o impacto da chuva sobre o solo era o principal fator desencadeador do processo erosivo. No entanto, em inclinações superiores a 10%, foi observado que o escoamento superficial passava a ser predominantemente responsável pelo desprendimento das partículas do solo.

Ferreira et al. (2010) e Amorim et al. (2001) observaram, em seus estudos com um simulador de chuva em diferentes declividades, uma diferença na velocidade da água escoando na superfície do solo, decorrente da maior declividade, proporcionando uma maior energia cinética e, como consequência, uma maior capacidade de transporte de partículas do solo ocasionando um aumento na sua perda.

3.2.3. Erosão Superficial

Existem diversas categorias de erosão, comumente agrupadas em quatro principais: erosão hídrica, erosão eólica e erosão organogênica. Além disso, a classificação considera a origem dos processos erosivos, que podem ser naturais ou geológicos, bem como antrópicos ou acelerados, de acordo com as observações de Ventura (2017).

Mariano (2015) comenta que a ação do ser humano na destruição da vegetação intensifica o processo erosivo. A vegetação desempenha um papel crucial na proteção do solo contra a erosão causada pelo vento e pela água, pois ela atua como uma barreira que impede o impacto direto das chuvas no solo e dificulta ocorrência da erosão superficial.

Thomaz (2012) chegou à conclusão de que a erosão induzida pelo fenômeno conhecido como “splash” que envolve o desprendimento de partículas de solo, foi notavelmente significativa em sua pesquisa. Ele observou que a liberação de partículas de uma superfície de solo seco foi mais do que o dobro em comparação com o solo úmido. Por outro lado, Verdum et al. (2016) afirma

que a redução da umidade resulta em um aumento na força de sucção, e muitos dos processos erosivos têm início em solos que não estão saturados de água.

Segundo Mermut et al. (1997), a diminuição dos materiais respingados devido ao fenômeno de “splash” pode ser compreendida como resultado da formação de uma película de água na superfície, a qual atenua o impacto da gota de chuva.

Ventura (2017) conceitua a taxa de erosão como a relação entre a quantidade de solo removida de uma área específica, expressa em peso ou volume do material erodido, dividida pela unidade de área e tempo. Essa definição desempenha um papel importante na avaliação da erosão durante os experimentos de simulação de chuva.

Os atributos do solo, como a granulometria e coesão, desempenham um papel fundamental na progressão do processo erosivo. A matéria orgânica presente no solo e as partículas de argila são as primeiras frações a serem desprendidas, representando as porções mais nutritivas para as plantas e, portanto, sua preservação é de grande importância, como indicado por Verdum et al. (2016).

Nessa perspectiva, Bertoni e Lombardi Neto (2010) concluem, ao analisar diferentes tipos de solos, que a composição granular é um dos elementos que exerce a maior influência na degradação dos solos, especialmente quando se considera sua estrutura. Solos que possuem uma textura argilosa e uma estrutura granular, como os latossolos, demonstram ter propriedades físicas mais favoráveis e, conseqüentemente, uma maior capacidade de resistência à erosão causada pela água.

3.2.4. Erodibilidade

Silva (2016) argumenta que erodibilidade refere-se à capacidade maior ou menor das partículas de solo de serem desprendidas e transportadas pelo agente erosivo, como a água, sendo essa uma característica que varia. Inicialmente, os primeiros modelos para avaliar a erodibilidade eram baseados em observações empíricas e consideravam os fatores que afetavam a quantidade de solo removido e transportado. Com o tempo, esses modelos

evoluíram e atualmente são conhecidos como modelos de processos, incorporando mecanismos hidrológicos, hidráulicos e físicos que interagem nos processos de erosão.

Conforme Bastos (1999) observa, a avaliação da vulnerabilidade à erosão hídrica decorrente do escoamento superficial é uma das características mais complexas dos solos, devido à abundância de variáveis envolvidas. De acordo Brito (2021), no caso de formações sedimentares, a suscetibilidade à erosão depende de fatores como a textura, estrutura, capacidade de infiltração e conteúdo mineral. A textura está relacionada à granulometria, que é representada pela curva granulométrica. A estrutura refere-se à disposição das partículas sólidas do solo e dos espaços ocupados por água e/ou ar, determinando assim as propriedades físicas do solo. A taxa de infiltração varia de acordo com a textura do solo, sendo que solos arenosos apresentam uma maior taxa, solos siltosos uma taxa intermediária e solos argilosos taxas menores. No que diz respeito aos componentes minerais do solo, a proporção de argila facilmente dispersa é considerada o fator mais relevante.

Ainda de acordo com Bastos (1999), a erodibilidade dos solos é quantificada através da relação entre massa seca da parte erodida de uma amostra e a sua área superficial, o que resulta em diferentes categorias, abrangendo solos com baixa, média e alta erodibilidade. Enquanto isso, o método desenvolvido por Heidemann (2008) define como erodível qualquer solo que tenha perdido mais de 5% de sua massa durante o teste, quando a amostra se encontra em seu estado natural de umidade e após 24 horas de secagem ao ar.

Conforme indicado por Silva (2016), a erosão tem uma menor eficácia em solos argilosos devido à influência da coesão. Por outro lado, Heidemann (2008), em sua pesquisa sobre as curvas granulométricas, notou que amostras que experimentaram perdas de massa significativas exibiram uma maior concentração de partículas finas.

Destarte, convém destacar que a intensidade da erodibilidade está relacionada ao tipo de solo, sendo que materiais com uma granulometria mais fina tendem a ser menos suscetíveis à erosão em comparação com aqueles de

granulometria mais grosseira, devido à presença de forças de coesão que dificultam a separação das partículas do solo (BRITO, 2021).

É importante mencionar que na literatura existe divergência de opiniões entre vários autores em relação a qual tipo de material é mais propenso à erosão, quando se leva em conta apenas a granulometria. Shi et al. (2012) também destacam em sua pesquisa a existência de relatos conflitantes na literatura em relação à fração granulométrica dos sedimentos.

Na pesquisa conduzida por Almeida (2013), foi notado que a erodibilidade do solo aumentou significativamente quando amostras previamente secas foram saturadas seja por escoamento superficial da água ou por inundação. Consequentemente, a erodibilidade do solo tende a aumentar no início do período chuvoso, devido à influência das chuvas intensas e ao baixo grau de saturação do solo. Dessa forma, pode-se afirmar que a erodibilidade está diretamente relacionada ao ciclo de precipitação na região estudada.

Portanto, a avaliação do potencial de erosão do maciço adquire uma significativa relevância para projetos que abordem o desempenho do solo sob condições específicas de carga, com o intuito de encontrar medidas preventivas e ações de redução dos processos erosivos.

3.2.5. Vegetação

Segundo Santos (2015), existem diversas abordagens proeminentes para preservar o solo e promover o crescimento de vegetação em declives de estradas, tais como: o uso de placas de grama, a técnica de plantio em covas ou semeadura, o método de hidro-semeadura, a aplicação de sacos de aniagem e o emprego de geossintéticos.

Assim, a vegetação desempenha um papel estético significativo nas superfícies de encostas de terra, além de contribuir para a prevenção da erosão. Ela é utilizada em várias construções de engenharia, seja em declives escavados ou aterrados, assim como em encostas naturais, com o propósito de reduzir o impacto visual, quando a vegetação está ausente (MARIANO, 2015).

Segundo as observações de Melo (2020), o uso da vegetação como medida de controle de processos erosivos não demonstra eficácia uniforme em

todas as situações de aplicação. No entanto, a vegetação desempenha papéis significativos na proteção contra erosão tanto mecanicamente como hidrologicamente. Além disso, desempenha um papel importante na condução da água da atmosfera para o solo, facilitando a infiltração da água e a drenagem superficial, o que pode alterar o padrão de volume e intensidade do escoamento relacionado à erosão.

De acordo com Melo (2016), um dos impactos hidráulicos mais prontamente identificáveis da utilização de vegetação para conservação do solo envolve a interceptação da precipitação pela planta e suas raízes, o que tem como consequência a prevenção da erosão causada pelas gotas de chuva e pelo escoamento superficial.

Pesquisadores apontam que o benefício mecânico primordial da vegetação reside na sua capacidade de fortalecer o solo ao ancorar suas raízes, resultando no aumento da coesão aparente do solo e na estabilização da camada superficial que, de outra forma, seria instável. No entanto, é importante notar que, dependendo do tipo de planta, seu peso adicional pode representar uma carga para a superfície do solo, o que por sua vez pode diminuir a estabilidade do talude (MELO, 2020).

Mariano (2015) ainda comenta que a retirada da vegetação que cobre os taludes resulta em um aumento dos efeitos desestabilizadores, sem levar em consideração a intensidade dos fatores envolvidos. A utilização de vegetação para cobrir os taludes contribui para a melhoria da paisagem e reduz o impacto ambiental causado pelas atividades humanas. Por essas razões e outras, torna-se fundamental adotar uma cobertura vegetal adequada nos taludes.

Nessa perspectiva, a utilização de simuladores de chuva em campo com cobertura vegetal a partir de 30% de cobertura do solo, segundo Guerra (2015), promove uma redução significativa de escoamento superficial, tornando-se mais difícil a formação de processos erosivos na superfície do terreno.

Ferreira et. al (2010) conduziram um estudo empregando um simulador de chuva com o propósito de avaliar as perdas de solo em diversas inclinações e tipos de cobertura. Eles constataram que é crucial adotar medidas de conservação adequadas para controlar a erosão, incluindo a proteção do solo

por meio de vegetação, a criação de terraços, o plantio em contornos, a implementação de cordões vegetativos, entre outras práticas.

Os resultados do estudo indicaram que a cobertura vegetal desempenhou um papel fundamental na preservação do solo, reduzindo a energia cinética do impacto das gotas de chuva, prevenindo a desagregação e evitando a formação de uma camada de selagem superficial.

3.3. Geossintéticos

De acordo com as diretrizes da ABNT NBR ISSO 10318-1:2018, a definição de geossintético se refere a um termo abrangente que se aplica a um produto, no qual pelo menos um de seus elementos é fabricado a partir de um polímero, seja sintético ou natural. Esse produto pode assumir a forma de uma manta, uma tira ou uma estrutura tridimensional, sendo utilizado em aplicações relacionadas à engenharia geotécnica e civil, em contato com o solo ou outros materiais.

O uso de geossintéticos na estabilização de taludes e na prevenção da erosão tem sido uma prática comum por um longo período, conforme descrito por Medeiros (2019), os geossintéticos agora fazem parte dos materiais de construção empregados em projetos de engenharia, oferecendo consideráveis benefícios para solucionar uma variedade de problemas em situações específicas. Isso inclui a redução do tempo de execução, a diminuição de custos, o controle da qualidade dos serviços e a extensão dos intervalos entre as manutenções regulares.

A maioria significativa das aplicações na prevenção da erosão é realizada utilizando geossintéticos em encostas escavadas e aterros, bem como nas margens de canais e corpos d'água, como mencionado por Marques e Geroto (2015). Esses pesquisadores também fazem referência a outro conjunto importante de utilizações de geossintéticos, que são as barreiras destinadas a conter e controlar a sedimentação, conhecidas como "*silt fences*".

Conforme observado por Melo (2016), os geotêxteis são empregados em projetos de engenharia geotécnica com o propósito de proporcionar proteção superficial em taludes e canais. Eles desempenham o papel de uma barreira

protetora que resguarda o solo contra os efeitos erosivos, reduzindo a velocidade do escoamento da água sobre as superfícies do solo e impedindo o transporte das partículas. Além disso, os geotêxteis também podem ser utilizados para fortalecer o solo em áreas suscetíveis à erosão ou já afetadas por esse processo.

Nesse sentido, Medeiros (2019) comentou que os geossintéticos são empregados para controlar os processos erosivos e para tanto devem possuir características que lhes permitam reter as partículas finas presentes nos solos subjacentes ou nos materiais em movimento, além de reduzir as velocidades de escoamento e os esforços tangenciais gerados pelo fluxo superficial.

3.3.1. Função e Classificação dos Geossintéticos

Em projetos de engenharia geotécnica, os geossintéticos têm a capacidade de cumprir uma ou várias funções ao mesmo tempo, conforme estabelecido pela norma NBR 12.553: Drenagem, controle de erosão superficial, impermeabilização, filtração, reforço, proteção, separação.

Os geossintéticos são categorizados com base em seu método de produção e propriedades específicas. As principais categorias de geossintéticos incluem geotêxteis, geogrelhas, georredes, geomembranas, geocompostos, geocélulas, geodrenos e as biomantas. A Tabela 02 assinala as principais funções dos geossintéticos mais utilizados na construção civil.

Tabela 02 – Principais funções dos vários tipos de geossintéticos

Geossintético	Separação	Proteção	Filtração	Drenagem	Erosão	Reforço
Geotêxtil	X	X	X	X	X	X
Geogrelha	X	-	-	-	-	X
Geomembrana	X	-	-	-	-	-
Georrede	-	X	-	X	-	-
Geocomposto argiloso	-	-	-	-	-	-
Geocélula	-	X	-	-	X	X
Geotubo	-	-	-	X	-	-
Geofibras	-	-	-	-	-	X
Biomanta	-	X	-	-	X	-

Fonte: Adaptado de Vertematti (2004)

Devido à ampla diversidade de características e funções encontradas nesses materiais, é essencial realizar uma análise antecipada para selecionar o tipo adequado, garantindo um desempenho satisfatório ao longo de sua vida útil (PINTO, 2019).

Melo (2020) comenta ainda que as funções que o geossintético desempenhará são organizadas em ordem de importância, e com base nisso, são identificadas as propriedades específicas que ele deve possuir quando incorporado à estrutura. Assim, não há um tipo de geossintético que seja superior aos demais, mas sim aquele que melhor se adapta à estrutura em que será utilizado.

3.3.2. Biomanta

Dentre as alternativas de geossintéticos, uma que tem destaque no controle da erosão é a biomanta. É fabricada a partir de recursos naturais, como fibras de coco, palha ou capim. Apresenta uma estrutura comparável à das geomantas e são capazes de se decompor naturalmente, reduzindo assim o impacto ambiental e contribuindo para a sustentabilidade do projeto (SANTOS, 2015).

No estudo de Mariano (2015) é discutida a capacidade das biomantas de proporcionar uma proteção imediata que resulta em maior estabilidade quando usadas em conjunto com plantas. Elas fortalecem e conectam o sistema de plantas-solo, estabelecendo assim um sistema artificial para fixação das raízes no solo, o que fundamenta sua aplicação em encostas extremamente íngremes.

Já Santos (2015) argumenta que o uso de biomantas como solução se torna impraticável em encostas extremamente inclinadas. Além disso, há restrições notáveis quando se trata de solos com baixa coesão, devido à falta de estabilidade adequada nas camadas superficiais para a instalação da biomantas. Isso também se aplica a áreas sujeitas a fluxos hidráulicos, como margens de rios e canais.

Melo (2016) também menciona que a biomanta não é recomendada para ser usada em encostas excessivamente inclinadas, pois, nesses casos, a

biomanta torna-se muito pesada e perde sua estabilidade na superfície da encosta quando ocorrem chuvas. Além disso, o autor destaca as principais vantagens da biomanta, que incluem a proteção superficial de encostas contra as condições climáticas adversas, a redução da erosão superficial causada pela água e o enriquecimento do solo com nutrientes, uma vez que o produto é degradável e serve como matéria orgânica.

As questões mais frequentes encontradas na utilização de biomantas estão relacionadas às falhas no processo de guarda e colocação. Quando as biomantas ficam expostas durante o armazenamento, estão vulneráveis a sofrer danos de natureza mecânica e ambiental, que podem resultar na inutilização do material antes mesmo de sua utilização (SANTOS, 2015).

Em se tratando da biomanta feita de fibra de coco, tem-se que a mesma oferece vantagens significativas no controle da erosão em encostas naturais segundo estudos de Barrela (2007). A combinação da rede de fibras de coco com a vegetação resultou em uma redução notável na erosão do solo, com uma perda anual de solo aproximadamente 95% menos do que a que foi observada em encostas desprotegidas. Assim, a aplicação da biomanta também teve um impacto positivo na quantidade de matéria orgânica, níveis de umidade do solo e no crescimento das plantas nas encostas protegidas por ela.

Destarte, de acordo com Basu et al. (2019), a fibra de coco é um material apropriado para utilização devido à sua decomposição lenta e disponibilidade abundante a um custo reduzido. Conforme observado por Marques e Geroto (2015), as biomantas funcionam como uma fonte de nutrientes para as plantas, promovendo um aumento no crescimento e na estabilização da vegetação devido a sua característica de biodegradabilidade. Por outro lado, os geossintéticos não biodegradáveis resultam em uma maior retenção da camada de solo fértil e das sementes durante o processo de plantio.

3.3.3. Instalação em taludes

A aplicação de geossintéticos em um projeto de construção requer um grande cuidado no processo construtivo, pois isso desempenha um papel fundamental no resultado final e no comportamento esperado da estrutura solo-geossintético, adaptando-se às condições particulares do local. A Figura 07

ilustra o revestimento de um talude com uma biomanta que está sendo aplicada diretamente sobre o terreno previamente preparado.

Figura 07 – Instalação de biomanta em talude



Fonte: Autoria própria

Todos os tipos de geossintéticos utilizados para conter processos erosivos em taludes seguem um conjunto básico de etapas durante a instalação. Primeiramente, é necessário nivelar o talude, removendo qualquer entulho ou obstáculos que possam interferir na instalação eficaz do produto. Em seguida, é importante eliminar quaisquer irregularidades na superfície do solo para assegurar um contato completo entre o material e o terreno circundante. Após isso, é crucial posicionar o produto no topo do talude, desenrolando-o até a base do talude e fixando-o de acordo com as orientações fornecidas pelo fabricante. Por último, é necessário realizar o plantio de gramíneas, incluindo a aplicação de sementes, fertilizantes e adubos, a fim de melhorar a qualidade do solo e promover o crescimento saudável da vegetação (MELO, 2020).

No caso da biomanta, para a sua instalação é essencial que a superfície do talude seja preparada adequadamente, garantindo uma aderência completa da biomanta à superfície. Esse processo de preparação pode ser realizado de forma manual ou mecanizada, com o objetivo de eliminar as depressões causadas pela erosão e preencher quaisquer espaços vazios, a fim de evitar o surgimento de novos pontos de erosão, deslizamentos ou desmoronamentos (ARAÚJO, 2021).

Uma vez que as biomantas são disponibilizadas em forma de rolos, é necessário iniciá-las a partir da parte superior do talude, desenrolando-as na direção da base do talude. Deflor Bioengenharia (2007) comenta que a fixação das biomantas deve ser realizada com grampos, cuja quantidade e espaçamento devem seguir as orientações técnicas estipuladas no projeto. A Figura 08 apresenta diversos tipos de grampos e suas características para a fixação das biomantas.

Figura 08 – Tipos e características dos grampos para fixação das biomantas

Grampos	Tipo	Comprimento dos Grampos (cm) e Uso em Taludes (corte / aterro)					
		7,5	10,0	12,0	15,0	20,0	30,0
Aço		Corte	Corte	Corte	Aterro	Aterro	-
Bambu		-	-	Corte	Corte	Aterro	Aterro
Madeira		-	-	-	Aterro	Aterro	Aterro

Fonte: Deflor Bioengenharia (2007)

Nesse contexto, Santos (2015) ainda comenta sobre a relevância de garantir uma ancoragem eficiente através de uma adequada quantidade de grampos para a inclinação específica do terreno, a fim de evitar que a biomanta seja arrastada total ou parcialmente pela ação da chuva, expondo a área vulnerável à erosão. Quanto mais íngreme for a inclinação do terreno, maior será a quantidade de grampos necessária para assegurar a fixação e aderência completa do material à superfície do talude.

3.4. Enrocamento de pedras (*Rip Rap*)

Os enrocamentos representam métodos de engenharia empregados para gerenciar os processos erosivos, constituindo uma das várias estratégias de proteção e contenção de encostas, também conhecidas como RSP (Rock Slope Protection) ou “rip rap”. Essencialmente, essa técnica envolve a disposição de um ou mais camadas de pedras ao longo da encosta para conter a erosão (BRAUN, 2018).

Cada camada de rocha é graduada conforme porcentagens especificadas, com variados tamanhos dentro de determinados padrões. Destarte, Ribeiro (2015) comenta que os enrocamentos são técnicas que permitem uma flexibilidade e as pedras têm a opção de se movimentarem para

níveis mais estáveis, não necessariamente afetando ou comprometendo a estabilidade do talude, e o solo que pode exercer o trabalho de preenchimento dos espaços vazios existentes entre as rochas.

Teixeira (2006) complementa ainda que os enrocamentos envolvem a prática básica de cobrir superfícies inclinadas, como taludes, margens de rios, encostas e aterros, com rochas ou blocos artificiais. Isso é feito com o propósito de criar uma estrutura sólida composta por rochas dispostas de maneira organizada ou empilhada, com a finalidade de proteger essas áreas contra os efeitos causados pelos processos erosivos.

A técnica de enrocamento exerce diversos papéis e apresenta diferentes facetas de estabilidade, incluindo influência na velocidade do fluxo da água, nas características físicas das rochas e nas condições turbulentas da área. Conforme apontado por Brighetti e Martins (2001), é fundamental que o dimensionamento do revestimento e as dimensões das pedras sejam projetados de maneira apropriada para resistir às deformações causadas pelas intempéries.

Ademais, a técnica de enrocamento unicamente na parte inferior do talude também contribui para a estabilidade do mesmo, uma vez que previne ocorrências de solapamento na base. Com um talude estável, haverá melhores condições para o estabelecimento de vegetação, por exemplo, proporcionando um ambiente mais propício ao seu crescimento e evitando problemas de erosões (RIBEIRO, 2015).

Em se tratando da simultaneidade da técnica do enrocamento com a vegetação, Braun (2018) discorre que:

A prática do enrocamento de rochas pode ser aplicada juntamente com ramos vivos, proporcionando assim uma maior proteção do talude em sua base, desenvolvendo a vegetação e garantindo maior estabilidade do talude. A utilização de solos deve ser utilizada para o preenchimento dos espaços vazios entre as rochas, possibilitando o desenvolvimento da vegetação. (pg. 51)

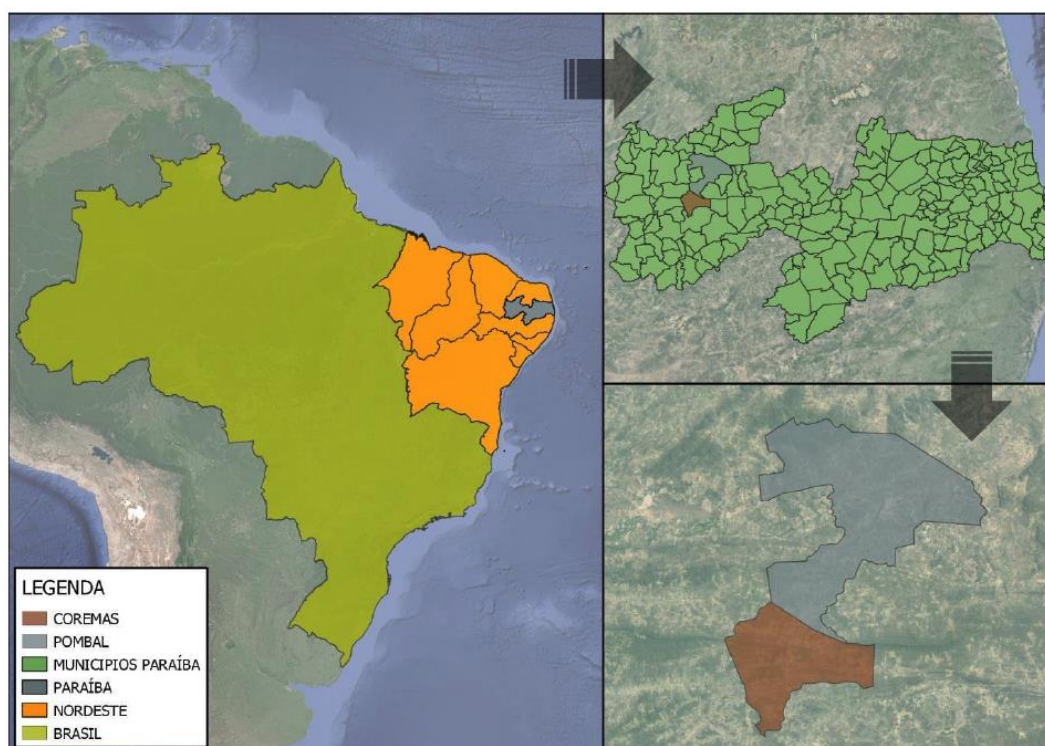
Por fim, vale ainda destacar que a eficácia do enrocamento com pedras depende da engenharia adequada do projeto e da seleção adequada dos materiais. Além disso, é importante considerar a regulamentação ambiental ao implementar essa técnica, pois pode afetar habitats e ecossistemas locais.

4. METODOLOGIA

4.1. Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo está localizada na divisa entre os municípios de Coremas e Pombal, a 405 km e 387 km respectivamente, de João Pessoa, capital do estado da Paraíba. A Figura 09 situa geograficamente esses municípios.

Figura 09 – Localização dos municípios de Coremas e Pombal



Fonte: Proyfe Brasil (2022)

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município de Coremas abrange uma extensão territorial de 379,012 km² e compartilha suas fronteiras com as cidades de Pombal ao norte, Cajazeirinhas ao nordeste, Emas a leste, Piancó ao sul, Aguiar a oeste e São José da Lagoa Tapada ao noroeste.

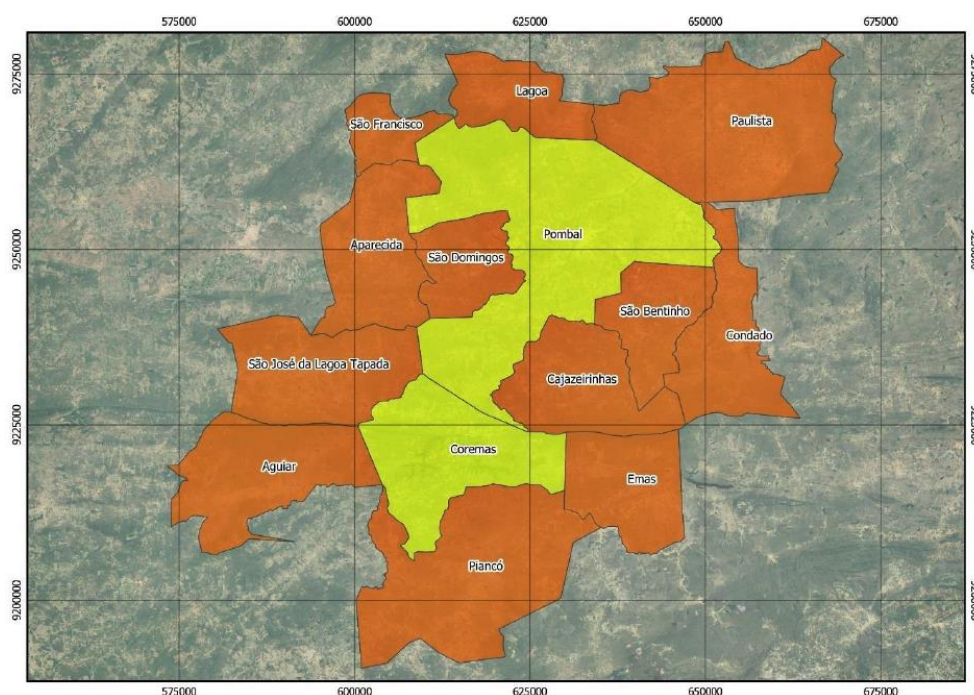
Politicamente, Coremas foi estabelecida pela lei número 1005 em 30 de dezembro de 1953 e teve sua emancipação em 04 de abril de 1954. Entre os anos 2000 e 2010, a população de Coremas registrou um crescimento anual médio de apenas 0,01% em contraste com a média nacional no mesmo período, que foi de 1,17%. Segundo dados do IBGE, a estimativa da população em 2019 era de 15.445 habitantes.

Em relação à cidade de Pombal, o IBGE descreve que a mesma abrange uma extensão territorial de 894,099 km² e compartilha suas fronteiras com as cidades de Lagoa ao norte, Paulista ao nordeste, Condado e São Bentinho a leste, Cajazeirinhas ao sudeste, Coremas ao Sul, São José da Lagoa Tapada e Aparecida a oeste, além de São Francisco ao noroeste.

Politicamente, Pombal foi criada por meio da lei número 2.076 em 30 de abril de 1959 e sua emancipação ocorreu em 03 de junho de 1959. Durante o período de 2000 a 2010, a população de Pombal experimentou um aumento médio anual de 0,05%. De acordo com dados do IBGE, a estimativa da população em 2019 atingiu 32.801 habitantes.

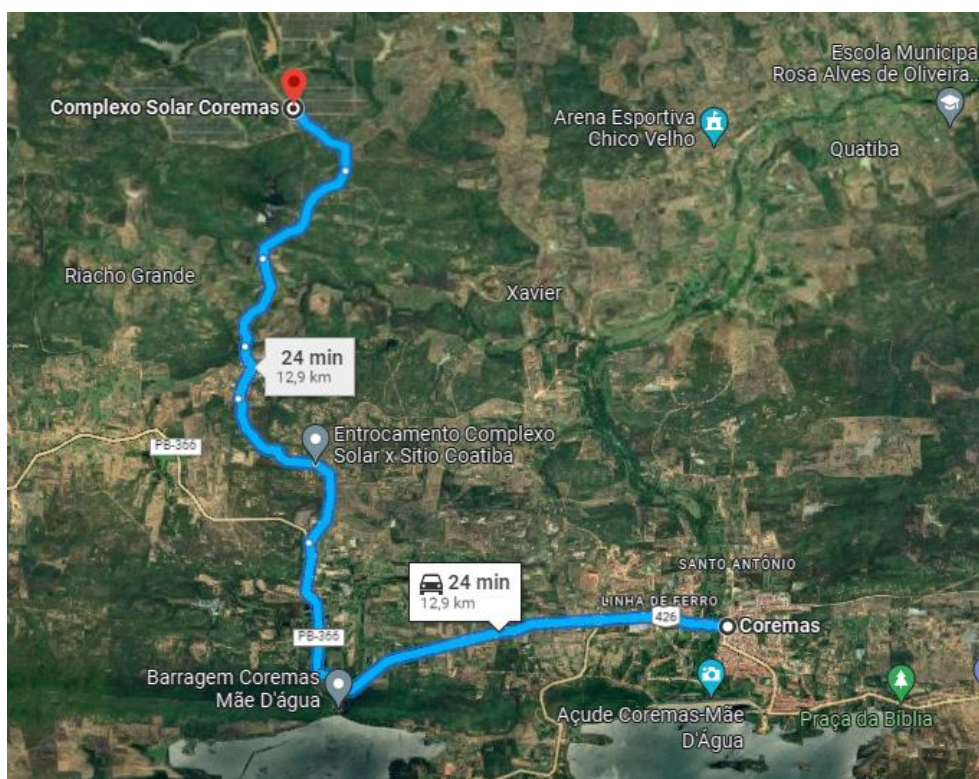
Os municípios de Pombal e Coremas estão situados na Mesorregião do Sertão Paraibano, sendo que Pombal está localizada na microrregião de Sousa e Coremas na microrregião de Piancó. A rodovia mais próxima à região do projeto é a PB-366. A área do projeto está localizada a aproximadamente 14,3km de distância do município de Coremas e a 40,9km do município de Pombal. A situação geográfica de ambas as cidades é mostrada na Figura 10. As Figuras 11 e 12 apresentam o acesso da zona urbana das cidades de Coremas e Pombal até o empreendimento em questão.

Figura 10 – Limites territoriais de Coremas e Pombal



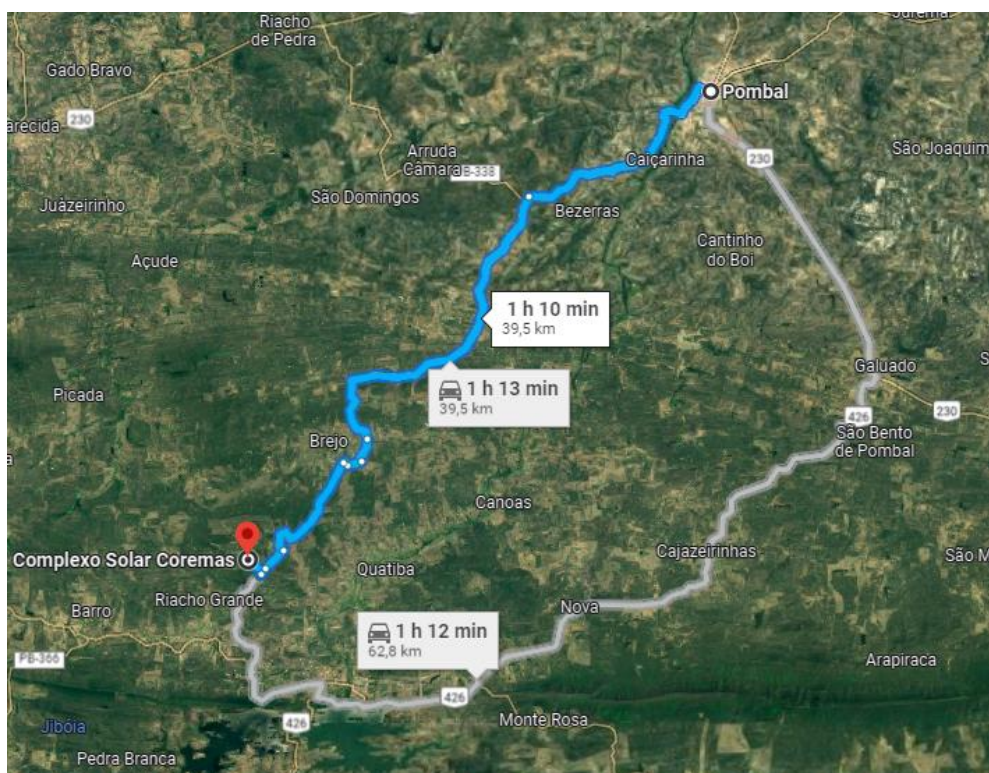
Fonte: Proyfe Brasil (2022)

Figura 11 – Acesso para o complexo solar pelo município de Coremas



Fonte: Google Maps (2023)

Figura 12 – Acesso para o complexo solar pelo município de Pombal



Fonte: Google Maps (2023)

Assim, a obra que compreende o objeto de estudo em questão se trata de um complexo solar fotovoltaico cuja escolha do local para instalação das

usinas foi estratégica: o sertão da Paraíba, que é identificado como uma das regiões com o maior potencial de exposição à radiação solar no Brasil, de acordo com as informações fornecidas pelo Plano Nacional de Energia de 2050, conforme dados mostrados no mapa da Figura 09.

4.1.1. Aspectos fisiográficos

Os municípios de Coremas e Pombal estão situados na região geográfica conhecida como Depressão Sertaneja, que representa o cenário característico do semiárido nordestino. Essa área se destaca por apresentar uma superfície plana e uniforme, com um relevo predominantemente suave e ondulado, ocasionalmente interrompido por vales estreitos com encostas desgastadas, segundo o Relatório de Estudo Hidrológico da Proyfe (2022).

Pontuando o horizonte, são encontradas elevações residuais, cristas e colinas que são testemunhas dos processos intensos de erosão que afetaram grande parte do sertão nordestino. Esse relevo faz parte do que é conhecida como a “Planície Sertaneja”, uma extensa área plana que, localmente, exhibe elevações residuais alongadas e alinhadas com a estrutura geológica regional (SANTOS et al., 2002).

No que diz respeito aos tipos de solo nas áreas de Patamares Compridos e Baixas Vertentes de terreno suavemente ondulado, encontramos os Planossolos. Esses solos são caracterizados por uma má drenagem, uma fertilidade natural de nível médio e problemas relacionados à presença de sais. Nas áreas de Topos e Altas Vertentes, por outro lado, encontramos os solos Brunos não Cálcicos, que são rasos e apresentam uma fertilidade natural elevada (PROYFE, 2022).

Nas regiões com Topos e Altas Vertentes em terreno ondulado, os solos predominantes são os Podzólicos, que possuem uma boa drenagem e uma fertilidade natural média. Já nas Elevações Residuais, os solos predominantes são os Podzólicos, que possuem uma boa drenagem e uma fertilidade natural média (PROYFE, 2022).

O Mapa Geológico da Paraíba (2002) comenta que no caso das Elevações Residuais, os solos predominantes são os Litólicos, que são rasos,

pedregosos e têm uma fertilidade natural média. Esses solos têm sua origem na desagregação e decomposição das rochas cristalinas da base geológica, sendo predominantemente do tipo Podzólico Vermelho-Amarelo, embora também haja a presença local de lotossolos e áreas restritas de solos aluviais.

A rede de drenagem na área é caracterizada como intermitente e possui um padrão primordialmente dentrítico. Isso ocorre devido à presença de fraturas geológicas, embora haja variações ocasionais para padrões retangulares e angulares. Em termos gerais, os principais riachos e outros cursos d'água na região atuam como afluentes que fazem parte da bacia do Rio Piancó (SANTOS et al., 2002).

No entanto, vale destacar que o fluxo de água nessa bacia é interrompido localmente devido à construção da barragem pública de Coremas, que atualmente é a maior barragem no estado da Paraíba. Essa barragem serve para armazenar água que é utilizada para fins de irrigação, criação de gado e abastecimento da população local (SANTOS et al., 2002).

Em termos de clima, o município de Coremas está localizado na região conhecida como “Polígono das Secas”, o que classifica como uma área de clima semiárido quente e seco, de acordo com a classificação de Koppen-Geiger (1961) adaptado por Kottek et al. (2006). Durante o dia, as temperaturas são elevadas, mas tendem a diminuir durante a noite, com variações anuais que geralmente ficam entre 23 e 30°C, embora ocasionalmente possam atingir picos mais altos, especialmente durante a estação seca.

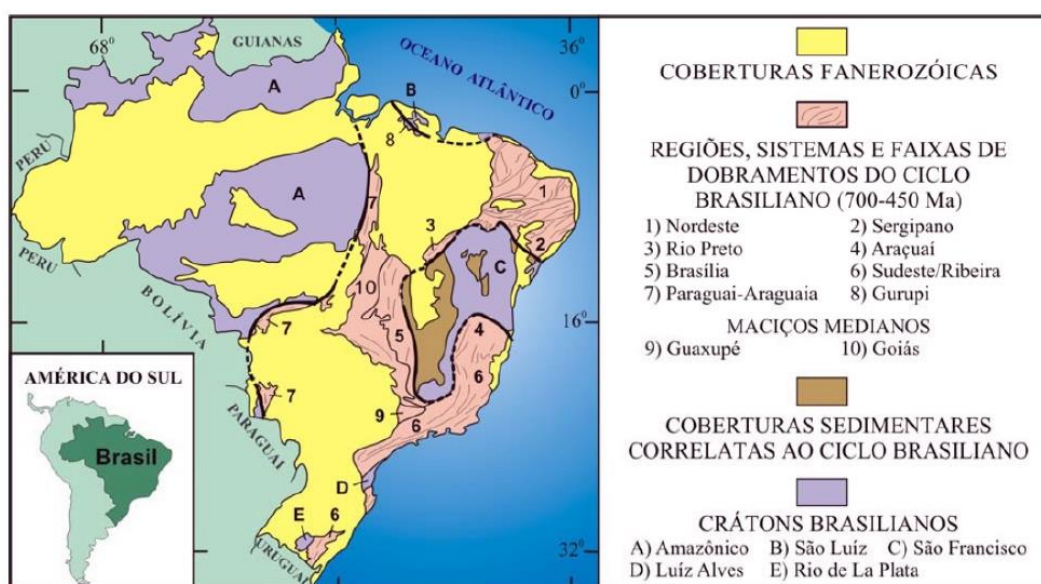
Segundo o Relatório Anual sobre a Situação dos Recursos Hídricos no Estado da Paraíba (2009) o regime de chuvas na região é caracterizado por ser tanto baixo quanto irregular, com uma média anual de precipitação de 882,3 mm/ano. No entanto, os valores mínimos e máximos de precipitação anual podem variar consideravelmente, indo de 342,7 mm a 1.837,7mm. Em resumo, o clima da região é marcado por apenas duas estações distintas: a estação seca, que corresponde ao verão e atinge seu auge entre setembro e dezembro, e a estação chuvosa, conhecida localmente como inverno, que ocorre por um período de 3 a 4 meses a cada ano.

O Relatório de Estudos Geológicos-Geotécnicos da Proyfe (2022) pontua ainda que a vegetação da área é predominantemente composta por Caatinga Hiperxerófila, onde destaca-se a presença de cactáceas, arbustos e árvores de pequeno a médio porte.

4.1.2. Geologia

Dado o local de interesse deste estudo, a Usina Fotovoltaica está localizada na região abrangida pela Folha Geológica Sousa. A Folha Sousa está situada na porção central-norte da Província Borborema, conforme descrito por Almeida et al. 1977. Esta região é predominantemente composta por formações geológica do período Precambriano e bacias sedimentares do Jurássico ao Cretáceo, incluindo elementos vulcânicos. Existem também pequenas porções de coberturas paleogênicas/neogênicas e camadas superficiais do período neogênico. Nessa perspectiva, a Figura 13 apresenta a divisão geológica do território do Brasil.

Figura 13 – Compartimentação geológica do território brasileiro

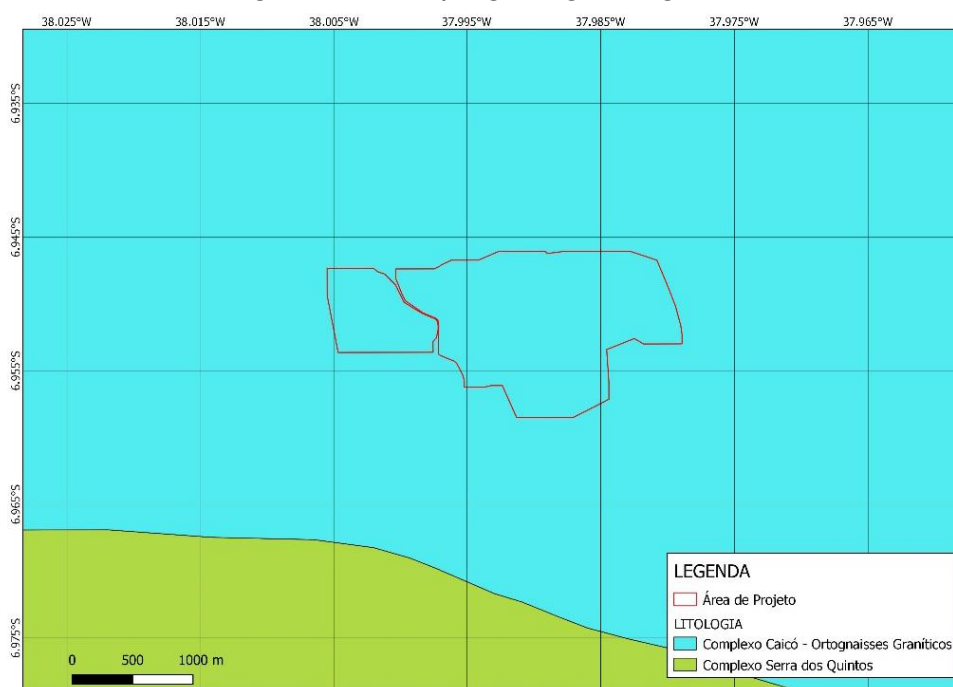


Fonte: Proyfe Brasil (2022)

Na década de 1990, surgiram novas abordagens para a divisão da Província Borborema, as quais se fundamentaram principalmente na estrutura tectônica da região. Ao aplicar o conceito de terrenos alóctones/exóticos, destaca-se a presença de terrenos estrangeiros ou de origem externa na região (SANTOS et al., 2002).

Quanto à litologia esperada para a área do empreendimento, a mesma pertence ao Complexo Caicó, de acordo com o Serviço Geológico do Brasil (2023) com base em um levantamento na escala 1:1.000.000. A Figura 14 apresenta o perímetro do complexo solar fotovoltaico a partir de um levantamento feito no Serviço Geológico do Brasil.

Figura 14 – Mapa geológico regional



Fonte: Serviço Geológico do Brasil (2023)

Assim, é possível inferir que a unidade em questão é formada por ortognaisses graníticos que exibem um padrão de bandamento gnáissico típico. Possuem uma coloração predominantemente cinza-esbranquiçada, uma granulação que varia de média a alta, e uma foliação de médio a alto ângulo. Sua composição geral inclui quartzo, plagioclásio e mica, especificamente a biotita.

Essas rochas são uma característica proeminente na maior parte da área do projeto, com muitos afloramentos visíveis em várias localidades, e também foram identificadas em quase todos os poços de inspeção, mesmo em profundidades subsuperficiais.

De acordo com o Relatório de Estudos Geológicos-Geotécnicos da Proyfe (2022), devido às características da topografia da área de Coremas, as rochas costumam ser encontradas em camadas superficiais, a uma

profundidade que varia de alguns centímetros a poucos metros abaixo da superfície. Além disso, em poços de inspeção mais profundos (com mais de 2 metros de profundidade), é possível encontrar rochas intemperizadas, conhecidas como saprólito.

4.1.3. Condições climáticas

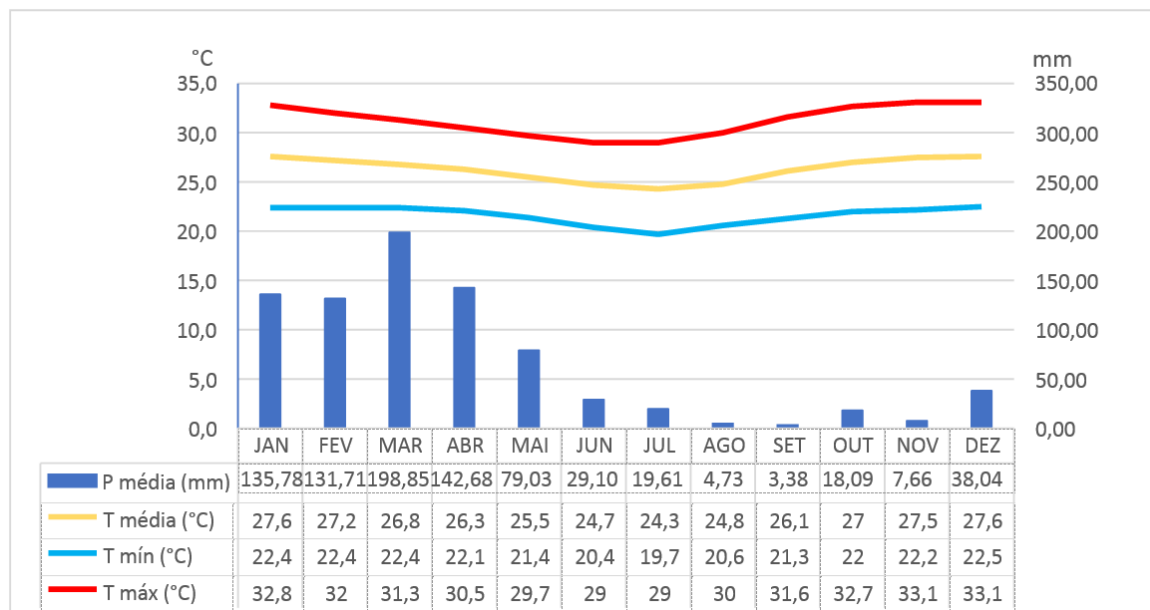
A bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu exibe dois tipos de climas, conforme definidos pela classificação de Köppen: o tipo A, que corresponde ao clima tropical, na porção superior da bacia, e o tipo B, associado ao clima árido, nas demais áreas da bacia. O estado da Paraíba apresenta duas épocas distintas de chuvas: uma ocorre de fevereiro a maior, nas regiões do Alto Sertão e Cariri/Curimataú, enquanto a outra se estende de abril a julho, afetando o Agreste, o Brejo e o Litoral.

O clima em Pombal e Coremas é do tipo Tropical, classificado como As de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger. Esse tipo de clima se caracteriza por ter uma estação de seca mais pronunciada durante o verão. A estação chuvosa ocorre de janeiro a maio, enquanto a estação seca abrange o período de junho a dezembro em ambos os municípios.

Em ambos os locais, setembro é o mês mais seco, enquanto março é o mês com maior precipitação. A precipitação média anual é de 765 mm em Pombal e 809 mm em Coremas. As temperaturas médias anuais são de 26,7°C em Pombal e 26,3°C em Coremas. Janeiro é o mês mais quente do ano, com temperaturas médias em de 27,9°C e 27,6°C em Coremas, enquanto julho é o mês mais frio, com temperaturas médias de 25°C em Pombal e 24,3°C em Coremas.

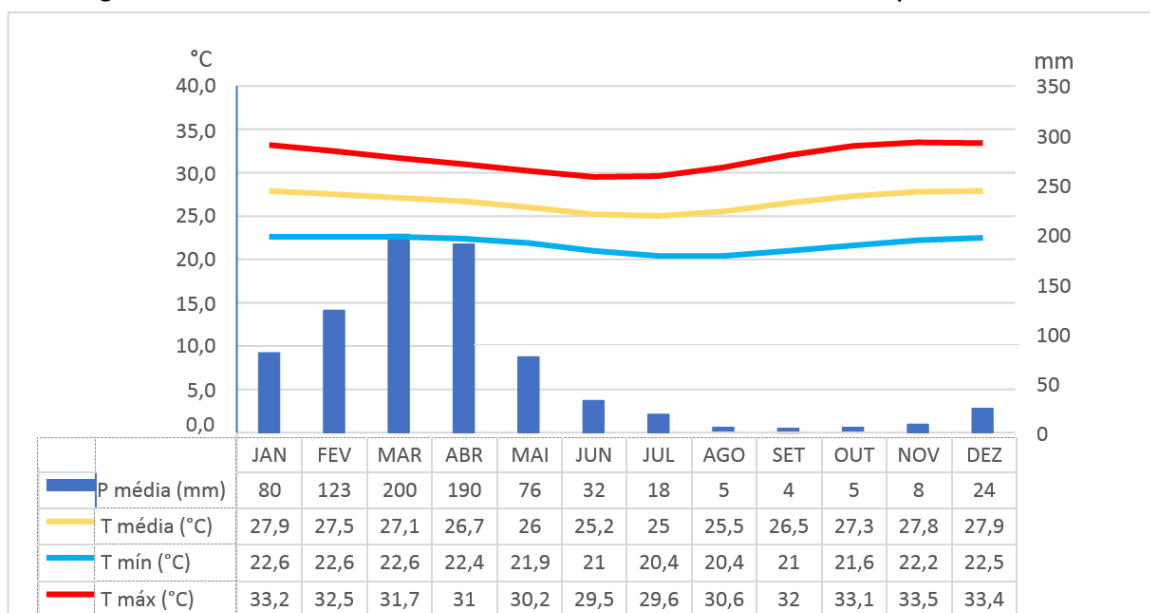
Assim, os gráficos que constam nas Figuras 15 e 16 foram elaborados com base nos dados provenientes da Agência Executiva de Gestão das Águas - AESA (2023) a partir das séries temporais de precipitação coletadas na Estação Pluviométrica Coremas/Açude Coremas no período de 2002 a 2022, juntamente com informações climáticas obtidas para o município de Pombal.

Figura 15 – Séries históricas e dados climáticos do município de Coremas



Fonte: AESA (2023)

Figura 16 – Séries históricas e dados climáticos do município de Pombal



Fonte: AESA (2023)

4.2. Objeto de estudo

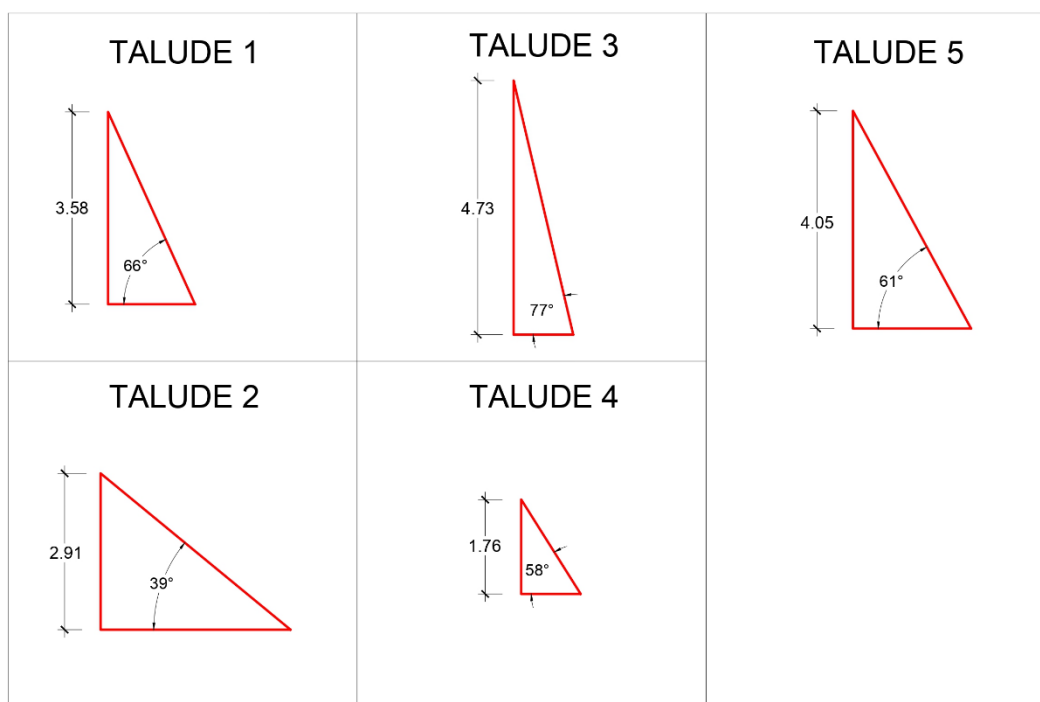
Como o objetivo da pesquisa é comparar a eficiência das duas alternativas de proteção superficial de talude, selecionou-se cinco taludes dentro do empreendimento em questão. Destes selecionados, dois estão revestidos com a biomanta vegetal e dois com a superfície enrocada com pedras de mão. Além desses, selecionou-se também um talude que não recebeu nenhum tipo

de proteção superficial para realizar os desdobramentos necessários nas discussões do presente trabalho.

A partir do aplicativo de celular “Gaia GPS” foram obtidas as coordenadas geográficas dos pontos mais baixos de cada um dos taludes, a saber, os pés. De igual modo, também foram obtidas as coordenadas geográficas dos pontos mais altos dos taludes, a saber, as cristas.

Foi medido em campo ainda o comprimento de rampa de cada um dos taludes e a partir das coordenadas de latitude e longitude coletadas com o “Gaia GPS” foram desenhadas as respectivas seções transversais. Para garantir a precisão das medidas no traçado, utilizou-se o software “AutoCad” na execução do desenho. Com isso, foram obtidos as alturas verticais e os ângulos de inclinação das encostas, tal como mostra a Figura 17.

Figura 17 – Seção transversal dos taludes



Fonte: Autoria própria

A partir dos dados coletados em campo e das precisas medidas passadas pelo “AutoCad”, reuniu-se as informações de todos os taludes estudados, incluindo registros fotográficos, na Tabela 03.

Tabela 03 – Registros e dados dos taludes

TALUDE	REGISTRO	DADOS
01		Inclinação: 66° Comprimento de rampa: 3,93m Altura: 3,58m Revestimento: Biomanta
02		Inclinação: 39° Comprimento de rampa: 4,58m Altura: 2,91m Revestimento: Enrocamento de pedras
03		Inclinação: 77° Comprimento de rampa: 4,86m Altura: 4,73m Revestimento: Biomanta

04		Inclinação: 58° Comprimento de rampa: 2,05m Altura: 1,76m Revestimento: Enrocamento de pedras
05		Inclinação: 61° Comprimento de rampa: 4,61m Altura: 4,05m Revestimento: Ausente

Fonte: Autoria própria

4.3. Parâmetros geotécnicos

4.3.1. Coleta em campo

Os materiais deformados foram coletados das áreas dos taludes que apresentavam evidências de erosão. Com isso, objetivou-se obter os dados mais representativos possíveis da situação, já que esse material foi posteriormente empregado nos testes de análise granulométrica, determinação dos limites de consistência e sedimentação.

A Figura 18 apresenta a coleta de solo deformado na região erodida de um dos taludes em questão.

Figura 18 – Ponto de amostra deformada do Talude 01



Fonte: Autoria própria

De igual forma, os materiais indeformados foram extraídos nas áreas erodidas dos taludes e, em seguida, empregados no Ensaio de Cisalhamento Direto, cujos resultados foram posteriormente aplicados no Programa GeoStudio. Além disso, as amostras indeformadas foram ainda utilizadas no Ensaio de Desagregação a fim de se investigar a erodibilidade dos solos estudados.

A Figura 19 mostra a área erodida de um dos taludes em questão em que foi retirada uma amostra de solo indeformada.

Figura 19 – Ponto de amostra indeformada do Talude 05



Fonte: Autoria própria

Para a coleta dos materiais indeformados foram usados um soquete e um tubo de PVC com 75mm de diâmetro. Utilizou-se 30cm de comprimento desse tubo para garantir uma amostra adequada para o ensaio de cisalhamento do solo em seu estado natural e saturado.

Após a coleta, ambos os materiais foram envolvidos em plástico filme e colocados em uma caixa de isopor para preservar as condições naturais em que foram encontradas.

4.4. Definição do método de estudo

Na avaliação, as abordagens de Fellenius e Bishop foram utilizadas com o objetivo de comparar os níveis de segurança obtidos em cada cenário e método. Para realizar essa comparação, o programa GeoStudio foi empregado.

O objetivo da análise é realizar uma comparação entre os níveis de segurança dos variados cenários apresentados anteriormente e abordar a estabilidade de taludes de forma abrangente, justificando assim a escolha desses métodos de análise, uma vez que são amplamente reconhecidos como os mais empregados para a investigação da estabilidade de massas de terra.

4.5. Simulação no Geostudio

O módulo Estabilidade de Taludes do programa GeoStudio foi empregado para avaliar a estabilidade das encostas de acordo com os dados obtidos através do Ensaio de Cisalhamento Direto. A avaliação se baseou no cálculo do fator de segurança, conforme previsto pela Teoria dos Estados Limite:

$$\frac{M_p}{M_a} > SFs$$

Em que:

- M_a : Momento desestabilizador
- M_p : Momento resistente
- SFs : Fator de segurança

O emprego do GeoStudio possibilita a análise considerando o pior cenário, através da simulação de várias superfícies de ruptura, levando em

consideração a situação crítica, ou seja, o colapso do maciço. A obtenção do cenário mais desfavorável é alcançada ao escolher a otimização no tipo de análise.

Então, realizou-se a análise dos cinco taludes estudados na condição de saturado, e sem considerar quaisquer estruturas de proteção ou cargas aplicadas na parte superior do talude. Dessa forma, foram obtidos os fatores de segurança para as encostas em questão nas situações mais delicadas, a fim de se ter parâmetros para contextualização da eficácia das soluções empregadas.

5. RESULTADOS

Como mencionado na metodologia, foram selecionados 5 (cinco) taludes como meios de estudo para se alcançar os objetivos inicialmente propostos. Daí, foram coletadas as amostras deformadas e indeformadas de cada uma das encostas para posteriormente submetê-las aos ensaios de laboratório cujos resultados serão devidamente detalhados.

Todos os ensaios laboratoriais que compõem esse trabalho foram executados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (LAPAV) localizado no Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

Generalizou-se que segundo a ordem de numeração de 01 a 05 já convencionadas na metodologia, as amostras serão igualmente nomeadas, sendo separadas em amostras deformadas, abreviadas como AD01, AD02, AD03, AD04 e AD05; e amostras indeformadas, abreviadas como AI01, AI02, AI03, AI04 e AI05.

5.1. Ensaios de Laboratório

5.1.1. Análise Granulométrica do Solo: Ensaio de peneiramento

5.1.1.1. Definições

O tamanho das partículas desempenha um papel de destacada importância, sendo necessária para determinar as frações predominantes de argila, silte e areia. Destarte, o método mais simples e direto para a obtenção da distribuição granulométrica de solos consiste no peneiramento.

O processo para análise granulométrica do solo está normalizado pela ABNT/NBR 7181/82. A distribuição granulométrica dos materiais granulares, areias e pedregulhos, é obtida pelo processo de peneiramento de uma amostra de solo, enquanto que para siltes e argilas se faz o uso do processo de sedimentação. Para solos que tem partículas tanto na fração grossa quanto na fração fina se torna necessário à análise granulométrica conjunta (MASSAD, 2016).

Este ensaio de granulométrica serve para o reconhecimento do tamanho dos grãos de um solo, que consiste em geral de duas fases: peneiramento e

sedimentação. O peso do material que passa em cada peneira, referido ao peso seco da amostra é considerado como a “porcentagem que passa”, e representado graficamente em função da abertura da peneira, esta em escala logarítmica, como o “diâmetro” das partículas (PINTO, 2006).

O processo de peneiramento consiste na separação dos sólidos de um solo em diversas frações. A análise por peneiramento tem como limitação a abertura da malha das peneiras, que não pode ser tão pequena quanto o diâmetro de interesse. A menor peneira costumeiramente é de nº 200, cuja abertura é de 0,075mm. Existem peneiras mais finas para estudos especiais, mas são poucos resistentes e por isto não são usadas frequentemente como as demais peneiras. A ordem da abertura das peneiras deve ser da maior para a menor (MASSAD, 2016).

5.1.1.2. Execução

Havendo procedido com a coleta das amostras deformadas e a devida preparação do solo, realizou-se o destorroamento para que o material ensaiado fosse o mais representativo possível do local onde foi coletado (Figura 20).

Figura 20 – Destorroamento do solo



Fonte: Autoria própria

A partir de então, pesou-se uma quantidade de 2 kg, que é a quantidade indicada segundo a NBR-248/2003 para solos arenosos, categoria em que o o

solo em questão está inserido. Daí, procedeu-se com o peneiramento manual de toda a porção do material na peneira de nº10 (2,00 mm).

A quantidade de material que ficou retida na referida peneira foi lavada na torneira com água corrente para garantir que resquícios associados aos grãos descessem pelo ralo da pia, tal como mostra a Figura 21.

Figura 21 – Lavagem do solo retido na peneira nº 10



Fonte: Autoria própria

Feito isso, deixou-se a água remanescente escorrer e colocou-se toda a porção de solo em uma cápsula de porcelana, anotou-se o peso bruto úmido e direcionou-o até a estufa que estava submetida a uma temperatura em torno de 110°C, onde ficou por cerca de 24 horas. Esta porção da amostra foi usada posteriormente no peneiramento grosso.

Enquanto isso, do material passante na #10, pesou-se 200 g, que correspondem a exatos 10% da amostra peneirada inicialmente conforme preconiza a norma e destinou-se essa porção a #200 (0,075 mm), lavando-se cuidadosamente em água corrente até que o material escorrido já estivesse visualmente desprovido de manchas que indicassem o resquício de materiais.

Terminada a lavagem, deixou-se a água remanescente escorrer e colocou-se o material numa cápsula de porcelana, anotando o peso bruto úmido do mesmo e direcionou-o até a estufa que estava submetida a uma temperatura em torno de 110 °C, onde também ficou por cerca de 24 horas. Esta porção da amostra foi usada posteriormente para o peneiramento fino.

Passadas as 24 horas de aquecimento na estufa, realizou-se a segunda parte do ensaio de análise granulométrica. Tanto a fração de solo grosso quanto a de solo fino foram retiradas da estufa e procedeu-se com a pesagem na balança de precisão de 0,1 g, anotando-se o peso bruto seco de cada uma destas.

Do material de fração grossa, realizou-se o referido peneiramento, passando o solo nas peneiras de nº 4, 8 e 10, juntamente com o recipiente de fundo. As peneiras foram dispostas na ordem, assim como comprova a Figura 22 e os movimentos manuais foram realizados para que os grãos fossem devidamente ordenados mediante o diâmetro equivalente respectivo.

Figura 22 – Peneiramento do solo grosso



Fonte: Autoria própria

Separou-se cada fração de cada uma das peneiras, fazendo-se o uso de escovas para desprender parte dos grãos que permaneceram aderidos às malhas das peneiras. Estando a peneira completamente ausente de grãos, procedeu-se com a pesagem. Repetiu-se este protocolo com todas peneiras para depois operar os cálculos e distribuir as porcentagens referentes a cada uma das malhas.

Realizou-se também o peneiramento fino com a respectiva fração de solo retirada da estufa, passando o solo nas peneiras de nº 16, 30, 40, 50, 80, 100 e 200, juntamente com o recipiente de fundo, também dispostas na ordem especificada, tal como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Peneiramento do solo grosso



Fonte: Autoria própria

Havendo procedido com os cálculos e determinado os percentuais das massas retidas em cada uma das peneiras, foi possível realizar a classificação do solo ensaiado com base nos protocolos e tabelas do SUCS.

5.1.1.3. Resultados obtidos

Foi inicialmente determinada a umidade higroscópica do solo a partir dos dados anotados nas pesagens, considerando a seguinte fórmula:

$$h(\%) = \frac{(PBU - PBS)}{PSS}$$

Sendo,

h: teor de umidade

PBU: Peso Bruto Úmido

PBS: Peso Bruto Seco

PSS: Peso do Solo Seco

Assim, os dados anotados e calculados estão dispostos na Tabela 04.

Tabela 04 – Resultados da umidade higroscópica

Cápsula	Tara (g)	PBU (g)	PBS (g)	PSS (g)	h (%) Umidade higroscópica
AD01	21,40	71,52	71,31	49,91	0,42
AD02	21,87	71,95	71,70	49,83	0,50
AD03	27,07	77,18	76,78	49,71	0,80
AD04	24,60	74,64	74,28	49,68	0,72
AD05	21,07	71,14	70,67	49,60	0,95

Fonte: Autoria própria

Para o cálculo das porcentagens passantes nas peneiras precisamos do valor da massa da amostra parcial seca, a qual é obtida pela seguinte fórmula:

$$M_s = \frac{M_A}{(100+h)} \times 100$$

Sendo,

M_s – Massa seca, dada em g;M_A – Massa da amostra seca ao ar, dada em g;

h: teor de umidade, dado em %.

Assim, os dados inerentes às amostras ensaiadas estão na Tabela 05.

Tabela 05 – Massas secas das amostras totais e parciais

Amostra	Item	Sigla	Valor
AD01	Fator de correção	FC	0,9958
	Amostra total úmida (g)	M _A	2000,00
	Amostra total seca (g)	M _s	1992,75
AD02	Fator de correção	FC	0,9950
	Amostra total úmida (g)	M _A	2000,00
	Amostra total seca (g)	M _s	1992,06
AD03	Fator de correção	FC	0,9920
	Amostra total úmida (g)	M _A	2000,00
	Amostra total seca (g)	M _s	1987,11
AD04	Fator de correção	FC	0,9928
	Amostra total úmida (g)	M _A	2000,00
	Amostra total seca (g)	M _s	1986,13
AD05	Fator de correção	FC	0,9906
	Amostra total úmida (g)	M _A	2000,00
	Amostra total seca (g)	M _s	1984,76

Fonte: Autoria própria

Para o peneiramento grosso, no cálculo das porcentagens de material passante nas peneiras de nº 2", 1 ½", 1", ¾", 3/8", 4, 8 e 10, fazemos uso da seguinte fórmula:

$$P_{pas} = \frac{P_p}{P_s} \times 100$$

Sendo,

P_{pas} : Porcentagem de material passante em cada peneira;

P_p : Peso da amostra passante em cada peneira;

P_s : Peso da amostra total seca.

Enquanto que para o peneiramento fino, no cálculo das porcentagens de material que passa nas peneiras de nº 16, 30, 40, 80, 100 e 200, fazemos uso da seguinte fórmula:

$$P_{pas} = \frac{P_{N^{\circ}10} \times P_p}{P_s}$$

Sendo,

P_{pas} : Porcentagem de material passante em cada peneira;

$P_{N^{\circ}10}$: Porcentagem de material passante na peneira nº10 (2,00 mm);

P_p : Peso da amostra passante em cada peneira;

P_s : Peso da amostra parcial seca.

De posse das fórmulas, procedeu-se com os cálculos das porcentagens de material passante tanto no peneiramento grosso como no fino. Os dados dispostos nas Tabelas 06 e 07 se referem à Amostra Deformada 01.

Tabela 06 – Resultado do peneiramento grosso da AD 01

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL					
Peneiras		Material Retido			% passante
Nº	(mm)	Massa (g)	% Amostra Total	% Amostra Acumulada	Amostra Total
1 1/2pol	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
1 pol	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4pol	19,1	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8pol	9,5	41,65	2,09	2,09	97,91
Nº 4	4,8	78,49	3,94	6,03	93,97
Nº 10	2,0	148,63	7,46	13,49	86,51

Fonte: Autoria própria

Tabela 07 – Resultado do peneiramento fino da AD 01

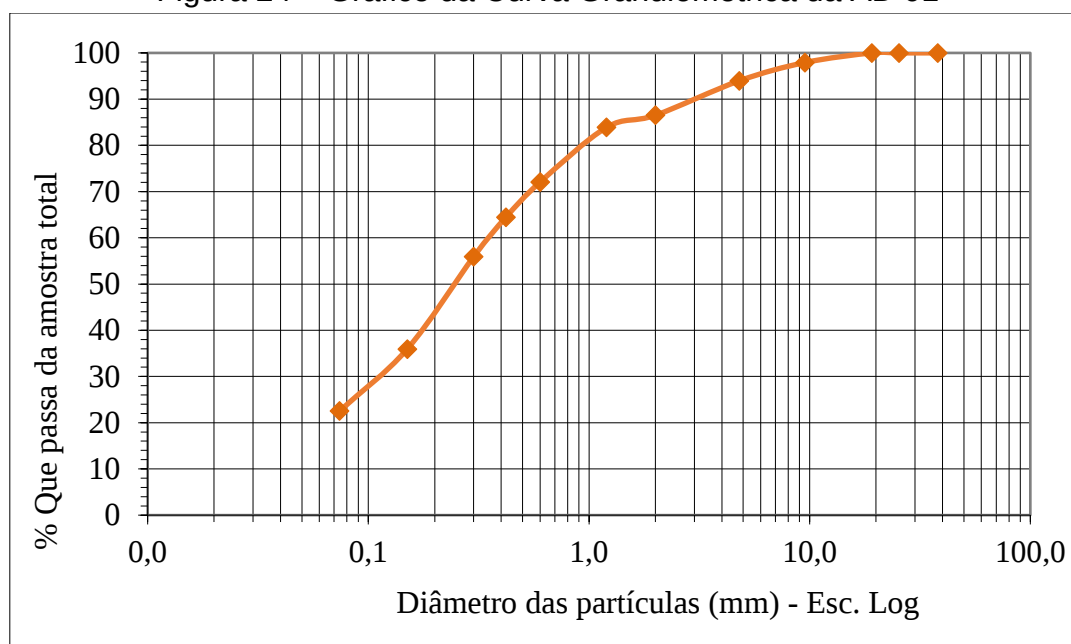
PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL						
Peneiras		Material Retido			% passa	
Nº	(mm)	Massa (g)	% Amostra Parcial	% Amostra Acumulada	Amostra Parcial	Amostra Total
16	1,20	3,030	3,043	3,043	96,957	83,88
30	0,60	13,630	13,687	16,730	83,270	72,04
40	0,42	8,750	8,787	25,517	74,483	64,44
50	0,30	9,820	9,861	35,378	64,622	55,91
100	0,15	23,000	23,097	58,475	41,525	35,92
200	0,074	15,440	15,505	73,980	26,020	22,51

Fonte: Autoria própria

O mesmo procedimento de cálculo foi realizado para as Amostras Deformadas 02 a 05 e as tabelas respectivas estão disponíveis nos Apêndices desse trabalho.

A partir de então, dispõe-se de dados suficientes para elaborar a curva granulométrica dos solos ensaiados através da união dos percentuais passantes do peneiramento grosso e do peneiramento fino. A Figura 24 apresenta o gráfico referente à curva granulométrica da Amostra Deformada 01:

Figura 24 – Gráfico da Curva Granulométrica da AD 01



Fonte: Autoria própria

Realizou-se o mesmo processo para as Amostras Deformadas 02 a 05 e os gráficos respectivos estão disponíveis nos Apêndices desse trabalho.

Sobre a classificação inicial dos solos, Pinto (2006) comenta que existem três grandes grupos:

a) Solos grossos: aqueles cujo diâmetro da maioria absoluta dos grãos é maior que 0,074 mm (mais que 50% em peso, dos seus grãos são retidos na peneira #200). Incluem pedregulhos, areias, solos pedregulhosos ou arenosos com pouca quantidade de finos.

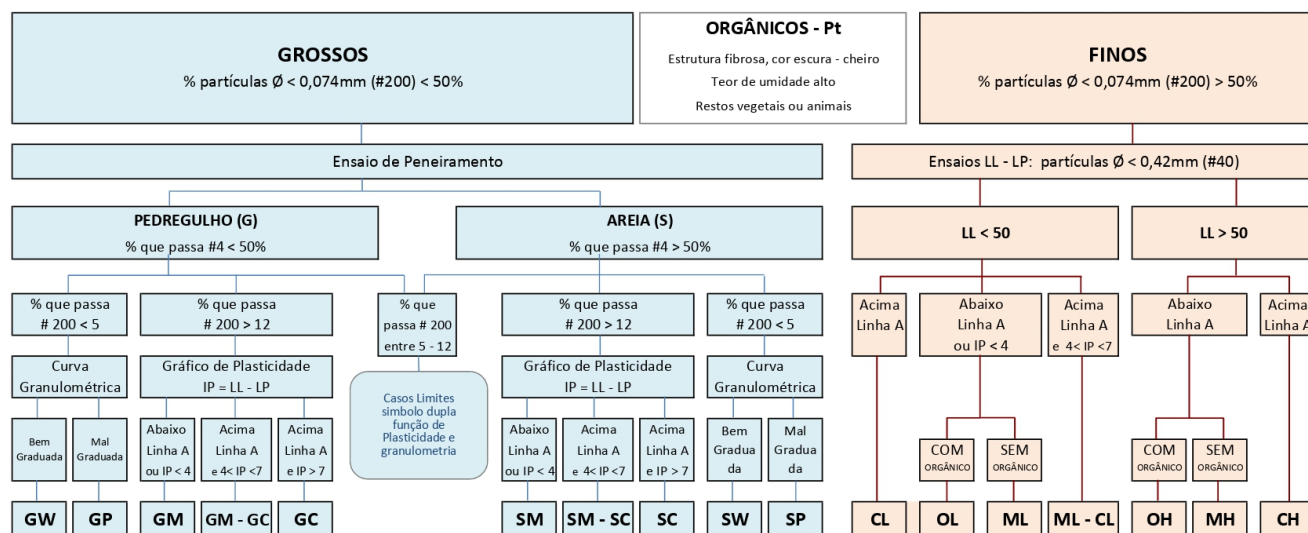
b) Solos finos: aqueles cujo diâmetro da maioria absoluta dos grãos é menor que 0,074 mm. Incluem siltes e argilas.

c) Turfas: solos altamente orgânicos, geralmente fibrilares e extremamente compressíveis.

No presente estudo, os percentuais retidos na peneira #200 são superiores a 50%, tal como é possível confirmar na Tabela 07 e nos Apêndices 02, 04, 06 e 08 Daí, pode-se afirmar que os solos das cinco amostras em questão devem ser inicialmente classificados como grossos.

Com a curva granulométrica já obtida e de posse dos dados apresentados, estamos aptos a proceder com a classificação detalhada das amostras. Utilizou-se o método do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) que consta na Figura 25, onde foi considerado o solo do tipo grosso.

Figura 25 – Classificação da SUCS para Solos Grossos



Fonte: Laboratório John Neves Braga Santos (2017)

A classificação foi baseada pelos dados das Tabelas 06 e 07 mais os Apêndices 01 a 08, orientando-se pelo método de classificação da SUCS. Daí, como a fração retida na peneira de nº 4 para as amostras ensaiadas foi, na ordem: 6,03%; 5,43%; 4,51%; 0,48% e 3,83%, todas menores de que 50%, o solo das amostras deformadas AD01 a AD05 é classificado como Areia (S).

Continuando, temos que os percentuais de solo passante na peneira de nº 200 foram: 22,51%; 21,71%; 24,14%; 23,80% e 17,10%, todos maiores que 12% e como não tivemos Limite de Liquidez (LL) e tampouco Limite de Plasticidade (LP), o Índice de Plasticidade é igual a zero, menor que 4, portanto, o solo de todas as amostras em questão é uma Areia do tipo SM.

Nessa perspectiva, Moraes (2018) comenta que a areia do tipo SM é uma das subcategorias da classificação de solo da SUCS, uma areia bem graduada e com suscetibilidade à erosão. Os Limites de plasticidade (LP) e de liquidez (LL) dessa subcategoria geralmente estão abaixo dos valores que definem solos com características plásticas. Ademais, essa areia é geralmente não coesiva e não forma uma massa coesa quando umedecida. É frequentemente usada em projetos de engenharia civil e construção, pois é fácil de compactar e pode ser usada como material de aterro.

5.1.2. Limites de Consistência

5.1.2.1. Definições

Segundo Fiori (2015), são três os limites de consistência dos solos, a saber: Limites de contração (LC), de plasticidade (LP) e de liquidez (LL). Sendo que o limite de contração corresponde à transição entre os estados sólido e semissólido, o limite de plasticidade diz respeito à transição entre os estados semissólido e líquido, e o limite de liquidez corresponde ao teor de umidade acima do qual o solo passa do estado plástico ao estado líquido.

Ainda que sejam baseadas em extensões investigativas experimentais, as definições desses limites são convencionais. Mesmo assim eles permitem, de uma maneira simples e rápida, dar uma ideia esclarecida acerca do tipo de solo e suas propriedades (FIORI, 2015).

O Limite de Plasticidade (LP) determinado pela porcentagem de umidade para a qual o solo começa a se fraturar quando se tenta moldar, com ele, um cilindro de 3 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento. As respectivas operações devem ser executadas em câmara úmida ou ambientes com umidade relativa do ar elevada (CAPUTO, 1988).

Já o Limite de Liquidez (LL) corresponde ao teor de umidade de um solo quando são necessários vinte e cinco golpes no aparelho de Casagrande para fechar uma abertura padrão executada na superfície da amostra.

5.1.2.2. Execução

5.1.2.2.1. Determinação dos Limites de Plasticidade

Para se determinar os Limites de Plasticidade, a amostra utilizada foi seca ao ar livre e destorroada à mão. Em seguida, fez-se o peneiramento de uma porção da amostra e desprezou-se o material retido.

O referido ensaio é regulamentado pela norma brasileira NBR – 7180 (1984d). Iniciou-se pesando, com o auxílio da balança de precisão, 100 g do solo destorroado e passado na peneira de Nº 40. Colocou-se então a referida amostra de solo num recipiente e homogeneizou-se com água até se obter uma massa plástica, assim como se pode observar na Figura 26. A adição de água ocorreu de forma gradativa, até adquirir a consistência para formar rolos cilíndricos.

Figura 26 – Homogeneização de amostra de solo ensaiada



Fonte: Autoria própria

Uma vez concluída a homogeneização, selecionou-se aproximadamente 10 g da massa, conforme orienta a respectiva norma, e procedeu-se com a formação de um elemento elipsoidal, com o auxílio das mãos. Depois dispôs-se o solo sobre a superfície de um vidro fosco e com a palma da mão e o auxílio dos dedos, rolou-se cuidadosamente a amostra até moldar um pequeno cilindro.

A norma estabelece que durante o processo de moldação deve-se ir retirando as extremidades do elemento a fim de facilitar o alcance do minucioso diâmetro. Os procedimentos foram realizados considerando estas prerrogativas, porém muito antes de alcançar a medida de diâmetro estabelecida, o solo ou apresentava fissuras consideráveis, ou se fragmentava, como mostra a Figura 27.

Figura 27 – Tentativa de moldagem do corpo cilíndrico



Fonte: Autoria própria

Nessas circunstâncias, a norma orienta a retirar o solo moldado e juntando com o restante da massa, dar continuidade à homogeneização com a adição de água. Assim foi feito, sempre realizando a limpeza adequada da superfície do vidro para evitar que resquícios do solo atrapalhassem as próximas tentativas.

Entretanto, repetindo novamente com a formação do elemento elipsoidal para a conseguinte formação dos rolos cilíndricos, foi-se deparado com a mesma situação. O solo apresentava fissuras expressivas antes da obtenção de 3 mm de diâmetro, ou se desintegrava.

O mesmo procedimento para determinação do Limite de Plasticidade foi realizado para as cinco amostras deformadas em estudo e as mesmas conclusões foram diagnosticadas: o corpo cilíndrico foi fragmentado muito antes de se obter o diâmetro estabelecido.

Todas as amostras de solo ensaiadas não exibiram propriedades plásticas ou viscosas depois da homogeneização e das diversas tentativas de moldagem dos corpos cilíndricos de solo. Foi taticamente possível de se perceber a arenosidade através do aspecto granular durante a movimentação manual, como se pode ver na Figura 28.

Figura 28 – Homogeneização manual de amostra de solo



Fonte: Autoria própria

Uma vez esgotadas as possibilidades de obter o cilindro de solo nas condições estabelecidas, resolveu-se dar por encerrado o ensaio e concluiu-se que nenhuma das cinco amostras apresentam Limite de Plasticidade.

5.1.2.2.2. Determinação do Limite de Liquidez

Quando um solo não tem limite de plasticidade, ele ainda pode ter um limite de liquidez, embora não seja muito comum. A presença de limites de liquidez e plasticidade em um solo está relacionada à quantidade de argila presente no mesm. Os solos com maior teor de argila tendem a apresentar

limites de liquidez e plasticidade, enquanto aqueles com baixo teor de argila, geralmente têm limites de plasticidade bem definidos.

Nessa perspectiva, o Limite de Liquidez é a umidade na qual o solo começa a se comportar como um líquido. Daí, como nas diversas tentativas da determinação do Limite de Plasticidade ficou comprovado que todas as amostras eram bem arenosas e, portanto, com comportamento insuficientemente líquido, dispensou-se a realização do ensaio do Limite de Liquidez.

5.1.3. Ensaio de Desagregação (“*Slaking Test*”)

5.1.3.1. Definições

A desagregação refere-se ao desmembramento de uma porção de solo que não está confinada, quando é exposta ao ar e posteriormente imersa em água. E de acordo com Infanti e Fornasari (1998), o termo “*slaking*” está relacionado ao empastilhamento, que é um fenômeno caracterizado pela alternância entre umedecimento e secagem do solo, podendo resultar na formação de fissuras em larga escala e na fragmentação em pequenas placas e pastilhas. Esse processo é impulsionado pela hidratação de minerais expansivos.

O *Slaking Test* tem como finalidade a avaliação da resistência da amostra de solo à desagregação quando submetida à imersão em água. No método comumente empregado, a imersão da amostra ocorre de forma gradual, sendo realizadas observações e registros do comportamento do solo em cada fase do processo.

Conforme indicado por Rodrigues e Lopes (1998), a ocorrência do fenômeno de desagregação ocorre pela frequente laminação natural nos materiais sedimentares. As pequenas peças que se soltam do maciço se acumulam na parte inferior de encostas. Os autores nomeiam esse evento como “erosão seca” porque, em certos casos, o desprendimento das peças pode ocorrer sem uma influência significativa da água proveniente do escoamento superficial ou da contribuição subsuperficial.

Em alguns relatórios, o teste de desagregação tem sido sugerido como um indicador qualitativo na avaliação da erodibilidade dos solos. Em contraste,

Bastos (1999) disserta que, em outros casos, a velocidade de desagregação tem sido proposta como um critério classificatório para a erodibilidade de solos superficiais em encostas.

5.1.3.2. Execução

Como se trata de um ensaio não padronizado, foram examinados relatos disponíveis na literatura especializada. Daí, baseou-se a execução do referido nas Metodologias de Laboratório para Estudos da Erosão Hídrica em Solos de Chamecki (2002), fazendo-se algumas adaptações necessárias.

Assim, foi realizada inicialmente a preparação de duas seções cilíndricas com diâmetro de 7,5cm e uma altura de 5 cm, a partir das amostras de solo indeformadas. Essas seções de solo foram testadas em duas condições de umidade: durante 5 minutos imersa em água e na umidade natural. Objetivou-se assim comparar os efeitos da desagregação no solo natural e saturado.

Após a moldagem dos corpos de prova, a metodologia em questão recomendou utilizar uma bandeja onde deveriam ser dispostas bases para cada uma das seções a ser ensaiadas. Essas bases deveriam ser de pedras porosas com dimensões adequadas para apoiar todo o material.

No entanto, como o laboratório não dispunha de tais bases, adaptou-se o procedimento distribuindo uma camada de pedra britada no fundo da bandeja a fim de obter condições próximas da pedra porosa, como mostra a Figura 29.

Figura 29 – Base com pedra britada



Fonte: Autoria própria

Uma vez preparada a base, dispôs-se alinhadamente duas seções cilíndricas de solo na umidade natural (sequência de baixo) e na condição de saturado (sequência de cima), para cada um dos objetos de estudo em questão, como consta na Figura 30.

Figura 30 – Base com pedra britada



Fonte: Autoria própria

Chamecki (2002) comenta que podem ser adotados dois procedimentos diferentes para o ensaio de desagregação: por inundação lenta e gradual e por saturação total e instantânea. Para o experimento em questão foi adotado apenas o primeiro procedimento, onde a água foi adicionada gradualmente e os resultados puderam ser percebidos de forma mais esclarecida.

Nessa perspectiva, o ensaio propriamente dito iniciou-se ao adicionar água até a altura da base das amostras, deixando-se o sistema em repouso por um tempo de 30 minutos, tal como comprova a Figura 31.

Figura 31 – Primeira etapa do Ensaio de Desagregação



Fonte: Autoria própria

Na sequência, adicionou-se água até a altura de $\frac{1}{3}$ (um terço) das amostras por um período de quinze minutos. Depois, foi acrescentada água até $\frac{2}{3}$ (dois terços) da altura das amostras durante mais quinze minutos. Por fim, assim como se pode ver na Figura 32, as amostras foram totalmente submersas e mantidas em repouso por um tempo de vinte e quatro horas.

Figura 32 – Segunda, terceira e quarta etapa do Ensaio de Desagregação



Fonte: Autoria própria

5.1.3.3. Resultados obtidos

Para avaliar o comportamento de diversos corpos de prova de maneira comparativa, a realização de testes simultâneos em um único recipiente é uma abordagem que neutraliza discrepâncias nos procedimentos, tais como variações nos intervalos de tempo, agitação e propriedades do líquido de imersão. No entanto, é importante considerar a possibilidade de que um corpo de prova possa afetar negativamente os demais devido ao seu colapso, por isso se tornou necessário manter uma distância segura entre eles.

Assim, no ensaio de Desagregação não foi necessário efetuar cálculos, realizou-se apenas observações no comportamento dos corpos de prova e na taxa de evolução dos processos de desmembramento do solo. Assim, foi utilizada uma abordagem usual para descrever os processos observados durante o ensaio, bem como para estimar a velocidade com que ocorrem.

Na primeira etapa do ensaio foi adicionada água até a altura da base das amostras, inundando-se toda a camada de pedra britada disposta no fundo da bandeja. No geral, as amostras ensaiadas permaneceram sem grandes alterações, observando-se apenas uma pequena dispersão de partículas na amostra de número três, tal como comprova a Figura 33.

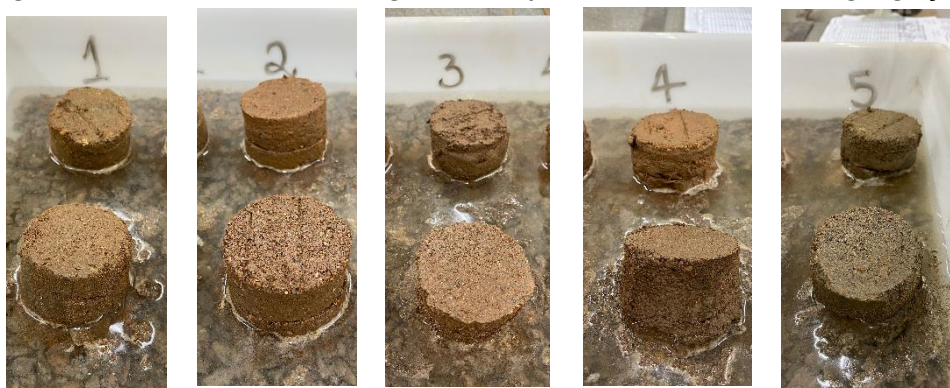
Figura 33 – Resultado da primeira etapa do Ensaio de Desagregação



Fonte: Autoria própria

Como já descrito, na segunda etapa do ensaio foi adicionada água até $1/3$ (um terço) da altura das amostras, deixando-se o sistema em repouso por um período de quinze minutos. No ensaio, foi possível observar algumas instabilidades nas amostras ensaiadas, uma vez que as mesmas já iniciaram um desmonoramento evidenciado pela desproporção das alturas, assim como ilustra as imagens que compõem a Figura 34.

Figura 34 – Resultado da segunda etapa do Ensaio de Desagregação



Fonte: Autoria própria

Na terceira etapa, adicionou-se água até $2/3$ (dois terços) da altura das amostras por mais um período de quinze minutos. Nessa perspectiva, observou-se instabilidades tanto nas seções de solo submetidas à umidade natural, quanto nas saturadas. No entanto, foi percebido um certo predomínio de instabilidades nas amostras que estavam na condição de umidade natural, em relação às que estavam na condição de saturado, assim se pode observar na Figura 35.

Figura 35 – Resultado da terceira etapa do Ensaio de Desagregação



Fonte: Autoria própria

A justificativa para a diferença se deve ao fato de que as seções que estavam saturadas foram inicialmente submetidas a um processo de compactação, enquanto que as seções que estavam na umidade natural foram apenas moldadas a partir das amostras indeformadas coletadas nos taludes em questão.

Vale destacar a instabilidade expressiva das amostras não saturadas de número quatro e cinco, que sofreram um abatimento quase que completo, indicando a alta erodibilidade dos solos em questão.

Na quarta e última etapa foi adicionada água até a altura máxima de todos os corpos de prova, por um período de vinte e quatro horas. Passado esse tempo, observou-se que todas as seções ensaiadas foram completamente abatidas. A formação de uma pilha de material desestruturado indica que as partículas do solo se separaram facilmente umas das outras durante o ensaio, o que geralmente significa que o solo tem baixa estabilidade e coesão.

Ocorreu o que Chamecki (2002) denomina de *slumping*, quando o corpo de prova se desagrega devido à hidratação e eliminação de ar, o que resulta na geração de pressões internas positivas, desencadeando a desintegração do solo, convertendo-o numa pilha de material desestruturado, tal como é possível de ser visto na Figura 36.

Figura 36 – Resultado da quarta etapa do Ensaio de Desagregação



Fonte: Autoria própria

É importante pontuar que não houve parâmetros suficientes para inferir que a amostra de um determinado talude fosse mais erodível que outro, haja vista a similaridade do desfecho na última etapa do ensaio. Mas se pode afirmar que todos os casos em questão apresentam solos suscetíveis à erosão, pois apresentam desagregação quando expostos à água.

Assim, tem-se que solos desestruturados são mais suscetíveis à erosão causada pela água. Em alguns casos, essa desagregação do solo pode ser um resultado da compactação excessiva, onde a estrutura do mesmo é destruída devido à pressão e compactação.

5.2. Análise da Estabilidade de Taludes

5.2.1. Geostudio

A avaliação da estabilidade foi conduzida por meio da aplicação do programa GeoStudio 2021 – Slope/W da GEO-SLOPE International Ltda, na versão estudantil, que se fundamenta na Teoria do Equilíbrio Limite. Dois métodos de análise foram empregados para calcular o Fator de Segurança, a saber, Bishop e Fellenius. Para cada perfil, determinou-se o menor valor de Fator de Segurança e a área de ruptura correspondente.

A seleção desses métodos baseou-se na análise das condições estáticas atendidas, na inclusão dos esforços normais e de cisalhamento das fatias, e na consideração da interação das forças entre as fatias. A Tabela 08 apresenta as condições citadas associadas aos métodos a serem empregados.

Tabela 08 – Resumo das características dos métodos de equilíbrio limite

Método	Superfície	Equilíbrio de Momentos	Equilíbrio de Forças Horizontais	Força Normal entre Fatias (E)	Força Cisalhante entre Fatias (Z)
Bishop simplificado	Qualquer	Sim	Não	Sim	Não
Fellenius	Circular	Sim	Não	Não	Não

Fonte: Fiori (2015)

Foram conduzidas análises em formato bidimensional, contemplando as condições de solo saturado, conforme já relatado. Nesse sentido, foram fornecidos como parâmetros de entrada os dados geométricos referentes aos perfis dos taludes em questão, apresentados na Figura 17.

Ademais, também foram necessários os dados de entrada referentes às propriedades dos materiais conforme o modelo Mohr-Coulomb, a saber, peso específico, coesão e ângulo de atrito. Uma vez classificado o solo como areia SM, verificou-se na literatura os valores respectivos para esse tipo de solo específico.

No que tange ao peso específico, Pereira (2019) vem a definir valores para solos arenosos conforme o estado de compactação, tal como consta na Tabela 09.

Tabela 09 – Peso específico de solos arenosos

Solos arenosos			
Compacidade	Peso específico (kN/m ³)		
	Seca	Úmida	Saturada
Fofa Pouco compacta	16	18	19
Medianamente compacta	17	19	20
Compacta Muito compacta	18	20	21

Fonte: Adaptado de Pereira (2019)

Assim, devido à terraplanagem realizada nas seções de aterro, considera-se que o solo arenoso em questão é compacto. Ademais, a análise de estabilidade será realizada para a situação mais crítica que é o solo saturado. Sendo assim, será estabelecido o peso específico de 21kN/m³.

Com relação ao ângulo de atrito, Ortigão (1993) apresenta valores característicos para as areias a partir da granulometria e do estado de compactação, assim como apresenta a Tabela 10.

Tabela 10 – Peso específico de solos arenosos

Compacidade	Compacidade		
	Compacta	Medianamente compacta	Do estado crítico
Areia fina (uniforme ou mal graduada)	32° a 36°	30° a 34°	26° a 30°
Areia média (uniforme ou mal graduada)	32° a 36°	30° a 34°	26° a 30°
Areia (bem graduada)	38° a 46°	34° a 40°	30° a 34°

Fonte: Adaptado de Ortigão (1993)

Tem-se que a caracterização dos solos de todos os taludes em questão, segundo a classificação do SUCS, resultou na areia SM, uma areia com granulometria mediana. Além disso, já foi mencionado que todos os solos em são compactos devido serem submetidos ao processo de terraplanagem. Sendo assim, pela Tabela 10 pode se obter o valor de 32° a 36° para o ângulo de atrito.

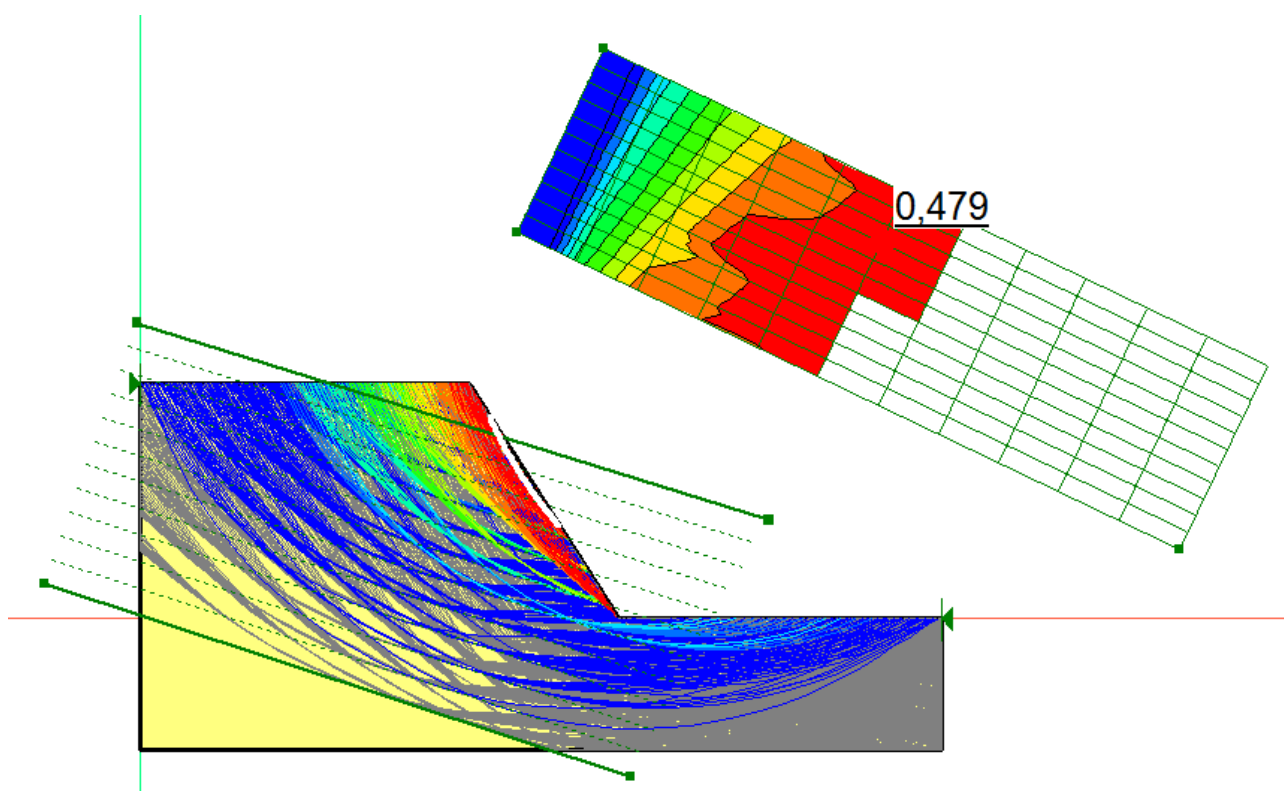
Vale ainda salientar que a análise foi feita para a situação em que o solo está saturado, condição que faz diminuir o ângulo de atrito. Então, será

considerado o menor valor do intervalo definido, ou seja, o ângulo de atrito de 32° para todos os taludes estudados.

E no tocante a coesão, devido novamente à condição de saturado que está sendo considerada, a água atua como um agente lubrificante entre as partículas do solo, reduzindo a aderência entre elas. Então, será considerado o valor zero para coesão.

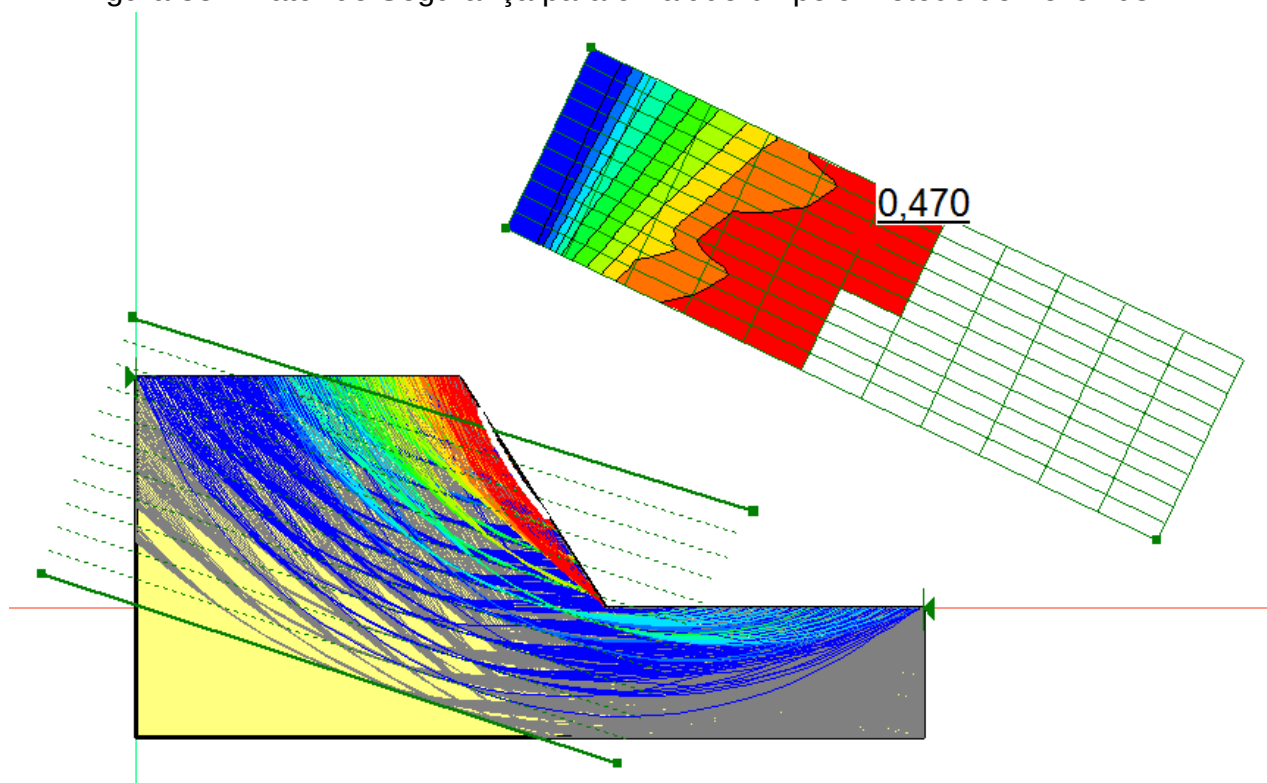
Então, considerando os parâmetros acima definidos, o programa Slope/W foi empregado para modelar os taludes em análise e calcular o fator de segurança na condição mais crítica. Consta nas Figuras 37 e 38 a definição do Fator de Segurança para o Talude 01 a partir dos métodos de Bishop simplificado e Fellenius.

Figura 37 – Fator de Segurança para o Talude 01 pelo Método de Bishop



Fonte: Autoria própria

Figura 38 – Fator de Segurança para o Talude 01 pelo Método de Fellenius



Fonte: Autoria própria

De igual modo, foi também definido o Fator de Segurança para os Taludes 02 a 05 cujas figuras constam nos apêndices desse trabalho. Contudo, a Tabela 11 exibe os resultados obtidos para todos os taludes utilizando os dois métodos em questão.

Tabela 11 – Fator de Segurança para os taludes 01 a 05

Talude	Fator de Segurança	
	Método de Bishop Simplificado	Método de Fellenius
01	0,479	0,470
02	1,089	1,079
03	0,222	0,210
04	0,574	0,563
05	0,487	0,481

Fonte: Autoria própria

Sobre os fatores de segurança mínimos para deslizamentos, na Figura 39 consta uma tabela em que a NBR-11682/2009 especifica os valores mínimos para deslizamentos.

Figura 39 – Fatores de Segurança mínimos para deslizamentos

Nível de segurança contra danos a vidas humanas Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Alto	Médio	Baixo
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: NBR-11682/2009

Então, como todos os Fatores de Segurança definidos por ambos os métodos foram menores que 1,2, pode-se afirmar que na condição de saturado, a estabilidade dos taludes está comprometida. Em termos geotécnicos, o Fator de Segurança é uma medida que compara a força resistente à força atuante ou solicitante. Assim, um fator de segurança menor que 1,2 significa que as forças que tendem a causar o colapso do talude são maiores do que as forças que o mantêm estável.

Em outras palavras, um fator de segurança menor que 1,2 indica que o talude está em risco de falhar. Isso pode resultar em deslizamentos de terra ou outros tipos de instabilidade do solo, o que pode ser arriscado para as estruturas do complexo solar fotovoltaico objeto do estudo em questão.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia solar surge como solução diante das crises de energia que o Brasil vem enfrentando nos últimos anos. Então, complexos solares fotovoltaicos estão sendo construídos para atenuar essa problemática, onde são criadas áreas de corte e aterro com taludes variados. No entanto, as precipitações causam erosão frequente nessas encostas, ameaçando a estabilidade das estruturas dos painéis solares.

Assim, soluções de proteção superficial foram aplicadas nos taludes de um determinado empreendimento para reparar e evitar as erosões. No entanto, percebeu-se que as medidas empregadas não foram totalmente eficazes haja vista a reincidência de erosões nas encostas. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise comparativa entre duas soluções de proteção superficial de taludes utilizadas em um complexo solar fotovoltaico a fim de se constatar a razão do problema.

Então, selecionou-se cinco taludes de um determinado complexo solar fotovoltaico do interior da Paraíba, dois revestidos com biomanta, dois revestidos com enrocamento de pedras e um ausente de proteção superficial a fim de se analisar a causa das erosões.

Nessa perspectiva, realizou-se os ensaios de análise granulométrica e determinação dos limites de plasticidade, e verificou-se que todos os taludes apresentam areia do tipo SM. Uma areia bem graduada e com suscetibilidade à erosão, sendo geralmente não coesiva. A partir da caracterização do solo, foram definidos o peso específico, ângulo de atrito e coesão do solo em questão, procedendo-se na sequência com a análise de estabilidade dos taludes em questão.

A partir das análises de estabilidade, percebeu-se que na condição de saturado todos os taludes apresentaram Fator de Segurança menor que 1,2, indicando movimentações de massa quando ocorre a saturação do solo.

Como os episódios de erosão são frequentes, julgou-se pertinente ainda realizar o ensaio de desagregação do solo a fim de se verificar a erodibilidade do solo de cada uma das amostras indeformadas coletadas. No ensejo, ficou

comprovado que todos os solos são vulneráveis à erosão, uma vez que sofrem rápida desintegração quando estão em contato com a água.

Ademais, observou-se que alguns dos taludes apresentam canaletas de drenagem rente aos pés dos taludes, mas nenhum destes apresenta dispositivos de drenagem em suas cristas. Uma vez comprovada a alta erodibilidade dos solos em questão, é importante que o percurso da água seja desviado da face dos taludes para atenuar o carreamento das partículas e consequentemente os episódios de erosão. Daí, a necessidade de se projetar canaletas de drenagem na região da crista dos taludes e mais dispositivos de drenagem que possam redirecionar o fluxo das águas pluviais.

Foi justificado na fundamentação teórica que a inclinação dos taludes afeta a eficácia de alguns materiais geossintéticos, dentre eles, a biomanta. No empreendimento em questão, utilizaram-na em taludes com inclinações de 66° e 77°, justificando assim que os problemas de erosão diagnosticados podem ter surgido devido a incompatibilidade do revestimento para a configuração de alguns dos taludes.

Existem diversas outras soluções com geossintéticos que podem ser mais eficazes na proteção das superfícies de taludes, prevenindo-os de erosões. Uma excelente sugestão seriam as geocélulas, as quais são utilizadas para estabilizar as encostas. Elas ajudam a controlar a migração de sedimentos em áreas sujeitas à erosão, evitando que os materiais erodidos sejam transportados.

No entanto, vale destacar que a escolha do geossintético adequado depende das condições específicas do local, incluindo o tipo de solo, a inclinação do talude e os objetivos de proteção contra a erosão. Assim, pode-se sugerir como tema para trabalhos futuros a definição e dimensionamento de geossintéticos para proteção das superfícies de taludes de complexos solares fotovoltaicos, onde pode ser feita inclusive uma análise dos custos de instalação desses materiais sintéticos.

Por fim, vale destacar que o solo é um material de considerável relevância para todos os âmbitos da engenharia civil e é necessário ressaltar que ele está sujeito a vários tipos de comportamentos. Portanto, é deveras necessário um

estudo mais aprofundado de suas características para que se possa conhecê-lo tal como é, e então se possa apropriar dele da maneira mais eficiente.

Assim, fica comprovada a importância de proceder com os ensaios laboratoriais e respectivas análises realizadas neste trabalho, para compreender as propriedades do solo em questão e, assim, fundamentar a base de execução de qualquer obra, quer seja utilizando situações compatíveis para com o solo testado, quer seja aplicando as soluções e correções necessárias para que o mesmo venha atender às necessidades da obra.

7. REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR ISO 10318-1. Geossintéticos – Parte 1: Termos e Definições. Rio de Janeiro, RJ, 9p.
- AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGAS DO ESTADO DA PARAÍBA. (2006). Relatório anual sobre a situação dos recursos hídricos no estado da Paraíba. Disponível em: <http://www.aesa.gov.br>. Acesso em: 08 out. 2023.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y., BRITO-NEVES, B.B.; FUCK, R.A. Províncias estruturais brasileiras. In: SIMPÓSIO GEOLOGIA NORDESTE, 8, 1977. Campina Grande. Anais... Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 363- 391, 1977.
- ALMEIDA, J. G. R. Erodibilidade de Solos Tropicais não Saturados nos Municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis - GO. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, UFG, Goiânia, GO, 2013. 133p.
- AMORIM, R. S. S., SILVA, D. D., PRUSKI, F. F. & MATOS, A. T. Influência da Declividade do Solo e da Energia Cinética de Chuvas Simuladas no Processo de Erosão entre Sulcos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB, 2001. Volume 5 Nº 1: 124 - 130.
- BASTOS, C. A. B. Estudo Geotécnico sobre a Erodibilidade de Solos Residuais não Saturados. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, RS, 1999. 303p.
- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. Conservação do Solo. Editora Ícone, 7ª Edição, São Paulo, SP, 2010. 360 p.
- BRITO, Thiago Pereira de. Estimativa da erodibilidade dos solos da microbacia hidrográfica de Vaca Brava, Areia – PB, utilizando diferentes modelos. Universidade Federal da Paraíba – Graduação em Engenharia Agrônoma. Areia, 2021. 68f.
- CALDERANO FILHO, B., CARVALHO JÚNIOR, W., CALDERANO, S. B., GUERRA, A. J. T. Suscetibilidade dos Solos à Erosão na Área de Entorno do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Tombos (MG). Revista Geonorte, Revista do Departamento de Geografia, UFAM, Manaus, 2014. Edição Especial 4, Volume 10 Nº 10: 476 – 481.
- CAMPOS, T. M. P & MOTTA, M. F. B. (2015). Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados. Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico, J. Camapum de Carvalho, G. F. N. Gitirana Júnior, S. L. Machado, M. M. A. Mascarenha & F. C. Silva Filho (orgs.), Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), São Paulo, SP, pp. 465-497.
- DEFLOR BIOENGENHARIA. Guia de Instalação de Biomantas Antierosivas, Retentores de Sedimentos e Hidrossemeio. Belo Horizonte. Minas Gerais. 2007.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. NORMA 106/2009: Terraplenagem - Cortes. Especificação de serviço. 2009.

FERREIRA, A. O., GONZATTO, R., MIOLA, A., ELTZ, F. L. F. & AMADO, T. J. C. Influência da Declividade e de Níveis de Cobertura do Solo no Processo de Erosão com Chuva Simulada. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, Mossoró, RN, 2010. 5(5): 182-190.

FIORI, Alberto Pio. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2015. 71 p.

GALEGO, Otávio; DE MARCO, Gerson. Terraplenagem na Construção Civil. RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar ISSN 2675-6218, [S. 1.], v. 1, n. 1, p. e29740, 2021. Disponível em: <https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/740>. Acesso em: 29 ago. 2023.

GERSCOVICH, D. Estabilidade de Taludes. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GUERRA, A. J. T. O Início do Processo Erosivo. Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações, A. J. T. Guerra, A. S. Silva, R. G. M. Botelho (orgs.), Bertrand Brasil, 10ª Edição, Rio de Janeiro, RJ, 2015. pp.17-55.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M., 1983, Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação, Ed. Blucher, 2ª edição, São Paulo, Brasil.

INFANTI JR., N. e FORNASARI FILHO, N. Processos de dinâmica superficial. In: OLIVEIRA, AM. dos S. e BRITO, S.N.A. de (Ed.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998. p. 131-152.

HEIDEMANN, M.; Estudo dos solos de uma encosta instável de São José – SC: intemperismo e comportamento geotécnico. 297 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

HEIDEMANN, M. Mapeamento Geotécnico de um Vetor de Expansão Urbana do Município de Tubarão – SC. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, SC, 2008. 178p.

JÚNIOR, Edvanil Albuquerque Duarte. Proposta de uso de fonte de energia híbrida fotovoltaica-eólica como forma de otimização do aproveitamento energético sustentável na iluminação de órgãos públicos. 2020. 99 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

KOTTEK, M. et al. World Map of the Koppen-Geiger climate classification update. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, v. 15, n. 3, p 259-263.

LAL, R. (2001). Soil Degradation by Erosion. *Land Degradation & Development*, 12: 519-539.

MARIANO, D. P. Efeito do Coberto Vegetal no Reforço e na Proteção de Taludes. Dissertação de Mestrado, Engenharia Geológica (Geotecnia), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2015. 95p.

MARQUES, A. C. M. & GEROTO, R. E. Aplicações em Controle de Erosão Superficial. Manual Brasileiro de Geossintéticos, J. C. Vertematti (eds.), Editora Edgar Blücher, 2ª edição, São Paulo, SP, 2015. pp. 421-456.

MEDEIROS, Allan Pereira de. Análise da Aplicação de Geossintéticos no Aterro Sanitário de Seropédica/RJ. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, PB, 2019. 68 f.

MELO, Jéssica Freire Gonçalves de. Utilização de Geossintéticos no Controle da Erosão. Monografia – Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, PB, 2016. 61 f.

MELO, M. T. S. Utilização de geossintéticos para controle de erosão superficial hídrica em face de talude. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2020. 152 p.

MORAES, Euler Paiva. Seguidor Solar de Um Eixo Inclinado. Centro Universitário de Brasília, UNICEUB, 2012.

MERMUT, A. R., LUK, S. H., RÖMKENS, M. J. M. & POESEN, J. W. A. (1997). Soil Loss by Splash and Wash During Rainfall from Two Loess Soils. Elsevier Science B. V. Geoderma 75: 203-214.

NASCIMENTO, Adriana de Souza. Energia solar fotovoltaica: estudo e viabilidade no nordeste brasileiro, 2015. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

ORTIGÃO, J. A. R. Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos. Rio de Janeiro - RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA., 1993. 368p.

Plano Nacional de Energia 2050 - Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020

QUANSAH, C. (1985). Rate of Soil Detachment by Overland Flow, with and without rain, and its Relationship with Discharge, Slope Steepness and Soil Type. EL-SWAIFY, S.A.; MOLDENHAUER, W.C. & LO, A., eds. Soil erosion and conservation. Iowa, Soil Conservation Society of America: 406-423.

QUEIROZ FILHO, Leogilton Fontes de. Drenagem em Obras de Engenharia – Estudo de Caso: Cidade de José da Penha / RN. Monografia (Curso de Administração) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pau dos Ferros, 43 p., 2019.

REN 21. Energy Policy Network For the 21st Century; Global Status Report; 2011.

REN 21. Energy Policy Network For the 21st Century; Global Status Report; 2021.

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental do Complexo Fotovoltaico Mauriti e Sistemas Assciados. 2019. Mauriti, CE. Disponível em: www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2020/01/RIMA_COMPLE XO_FOTOVAOLTAICO_MAUURITI.pdf. Acesso em: 12 de agosto de 2023.

RODRIGUES, R. e LOPES, J.A.U. Rodovias. In: OLIVEIRA, A M. dos S. e BRITO, S.N.A. de (Ed.). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998. p. 419-430.

SANTOS, E. J.; FERREIRA, C. A.; SILVA JR., J. M. F. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba. Mapa Geológico do Estado da Paraíba. Escala: 1:500.000. Recife: CPRM/DNPM, 2002.

SANTOS, Luana Maria dos. Erosão em taludes de corte: métodos de proteção e estabilização. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, SP, 2015. 73 f.

SHI, Z. H., FANG, N. F., WU, F. Z., WANG, L., YUE, B. J. WU, G. L. (2012). Soil Erosion Processes and Sediment Sorting Associated with Transport Mechanisms on Steep Slopes. *Journal of Hydrology*, 454: 123 - 130.

SILVA, Alexandre Eliseu da. Análise da Erodibilidade de Solos Residuais da Bacia do Itacorubi – SC. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, SC, 2016. 92 f.

SILVA, Luiz Fernando de Melo. Roteiro para implantação de sistemas de energia solar e estudo de caso. 2018. 92f.

TANUS, Andressa Aragão. Vulnerabilidade em áreas propensas a riscos de desastres por movimento de massa em Comunidades de João Pessoa/PB. João Pessoa, 2018. 78f.

THOMAZ, E. L. (2012). Runoff and Sediment Transport in a Degraded Area. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(1): 243-252.

VENTURA, Daniel Machado Lopes. Mapeamento da Suscetibilidade à Erosão dos Solos Residuais do Bairro Ratoões e Vargem Pequena. Trabalho de Conclusão de Curso – UFSC – Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis, 2017. 110f.

VERTEMATTI, José Carlos. Manual Brasileiro de Geossintéticos. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

VERDUM, Roberto; VIEIRA, Carmem Lucas; CANEPPELE, Jean Carlo Gessi. Métodos e técnicas para o controle da erosão e conservação do solo. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2016. 50f.

WEO. World Energy Outlook: October 2012. Coping with High Debt and Sluggish Growth. Disponível em: www.imf.org/-/media/Websites/IMF/imported-flagship-

issues/ external/pubs/ft/weo/2012/02/pdf/_textpdf.ashx. Acesso em 25 de julho de 2023.

8. APÊNDICES

Apêndice 01 – Resultado do peneiramento grosso da AD 02

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL					
Peneiras		Material Retido			% passante
Nº	(mm)	Massa (g)	% Amostra Total	% Amostra Acumulada	Amostra Total
1 1/2pol	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
1 pol	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4pol	19,1	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8pol	9,5	131,18	6,59	6,59	93,41
Nº 4	4,8	108,10	5,43	12,01	87,99
Nº 10	2,0	171,05	8,59	20,60	79,40

Apêndice 02 – Resultado do peneiramento fino da AD 02

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL						
Peneiras		Material Retido			% passa	
Nº	(mm)	Massa (g)	% Amostra Parcial	% Amostra Acumulada	Amostra Parcial	Amostra Total
16	1,20	5,020	5,045	5,045	94,955	75,40
30	0,60	20,520	20,623	25,668	74,332	59,02
40	0,42	10,850	10,904	36,573	63,427	50,36
50	0,30	12,780	12,844	49,417	50,583	40,16
100	0,15	17,610	17,698	67,115	32,885	26,11
200	0,074	11,120	11,176	78,291	21,709	17,24

Apêndice 03 – Resultado do peneiramento grosso da AD 03

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL					
Peneiras		Material Retido			% passa
Nº	(mm)	Massa (g)	% Amostra Total	% Amostra Acumulada	Amostra Total
1 1/2pol	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
1 pol	25,4	37,05	1,86	1,86	98,14
3/4pol	19,1	0,00	0,00	1,86	98,14
3/8pol	9,5	78,76	3,96	5,83	94,17
Nº 4	4,8	89,70	4,51	10,34	89,66
Nº 10	2,0	180,24	9,07	19,41	80,59

Apêndice 04 – Resultado do peneiramento fino da AD 03

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL						
Peneiras		Material Retido			% passa	
Nº	(mm)	Massa (g)	% Amostra Parcial	% Amostra Acumulada	Amostra Parcial	Amostra Total
16	1,20	4,630	4,667	4,667	95,333	76,83
30	0,60	16,120	16,250	20,917	79,083	63,73
40	0,42	8,480	8,548	29,465	70,535	56,84
50	0,30	10,960	11,048	40,513	59,487	47,94
100	0,15	18,880	19,032	59,545	40,455	32,60
200	0,074	10,410	10,494	70,039	29,961	24,14

Apêndice 05 – Resultado do peneiramento grosso da AD 04

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL					
Peneiras		Material Retido			% passante
Nº	(mm)	Massa (g)	% Amostra Total	% Amostra Acumulada	Amostra Total
1 1/2 pol	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
1 pol	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4 pol	19,1	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8 pol	9,5	5,06	0,25	0,25	99,75
Nº 4	4,8	9,50	0,48	0,73	99,27
Nº 10	2,0	57,32	2,89	3,62	96,38

Apêndice 06 – Resultado do peneiramento fino da AD 04

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL						
Peneiras		Material Retido			% passa	
Nº	(mm)	Massa (g)	% Amostra Parcial	% Amostra Acumulada	Amostra Parcial	Amostra Total
16	1,20	3,960	3,989	3,989	96,011	92,54
30	0,60	12,490	12,581	16,569	83,431	80,41
40	0,42	6,310	6,356	22,925	77,075	74,29
50	0,30	10,910	10,989	33,914	66,086	63,69
100	0,15	23,850	24,023	57,937	42,063	40,54
200	0,074	17,240	17,365	75,302	24,698	23,80

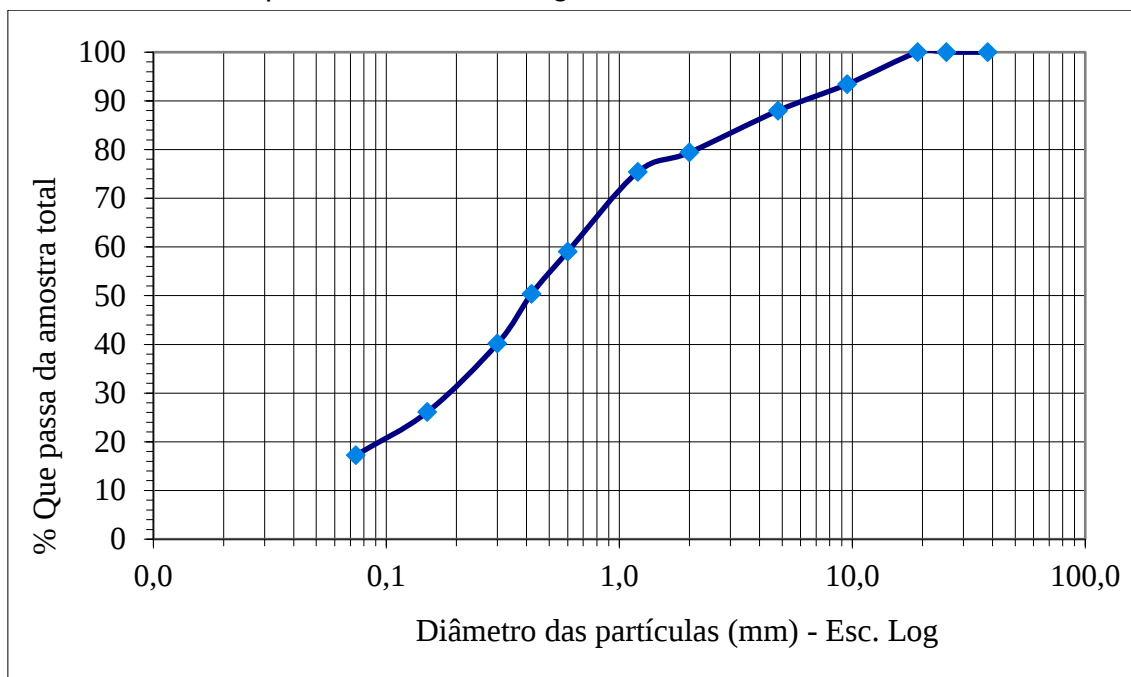
Apêndice 07 – Resultado do peneiramento grosso da AD 05

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL					
Peneiras		Material Retido			% passante
Nº	(mm)	Massa (g)	% Amostra Total	% Amostra Acumulada	Amostra Total
1 1/2 pol	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
1 pol	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4 pol	19,1	47,24	2,38	2,38	97,62
3/8 pol	9,5	33,24	1,67	4,05	95,95
Nº 4	4,8	76,08	3,83	7,89	92,11
Nº 10	2,0	220,13	11,09	18,98	81,02

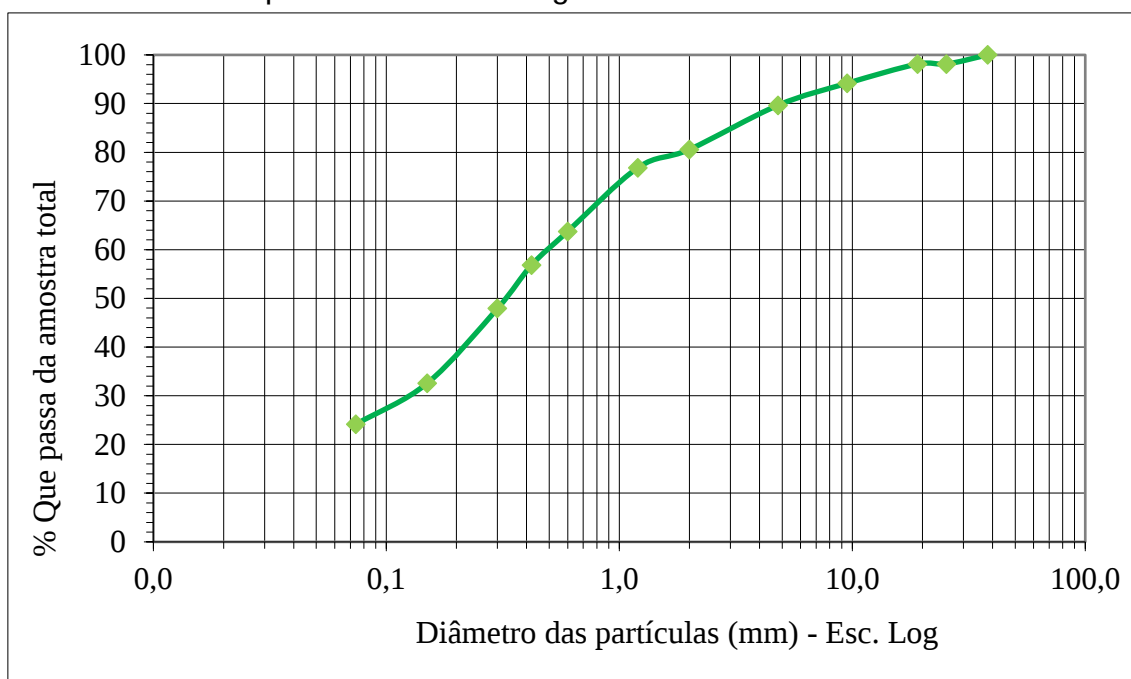
Apêndice 08 – Resultado do peneiramento fino da AD 05

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL						
Peneiras		Material Retido			% passa	
Nº	(mm)	Massa (g)	% Amostra Parcial	% Amostra Acumulada	Amostra Parcial	Amostra Total
16	1,20	7,030	7,097	7,097	92,903	75,27
30	0,60	17,980	18,150	25,247	74,753	60,57
40	0,42	9,000	9,085	34,332	65,668	53,20
50	0,30	11,440	11,548	45,881	54,119	43,85
100	0,15	20,200	20,391	66,272	33,728	27,33
200	0,074	12,500	12,618	78,891	21,109	17,10

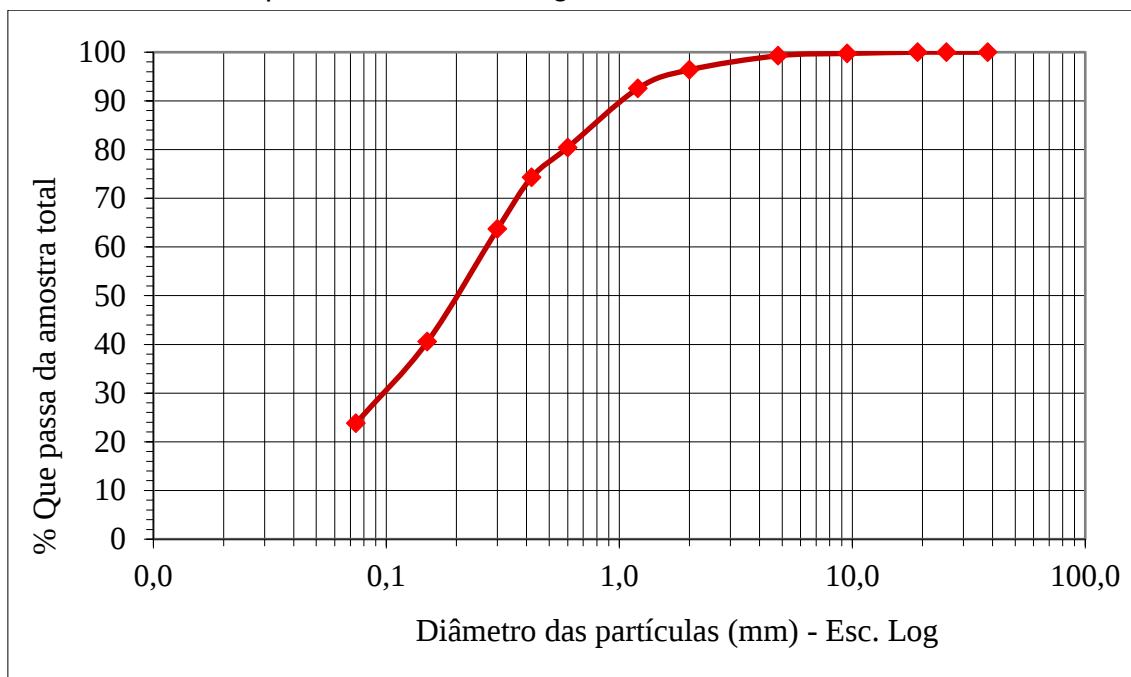
Apêndice 09 – Curva granulométrica da AD 02



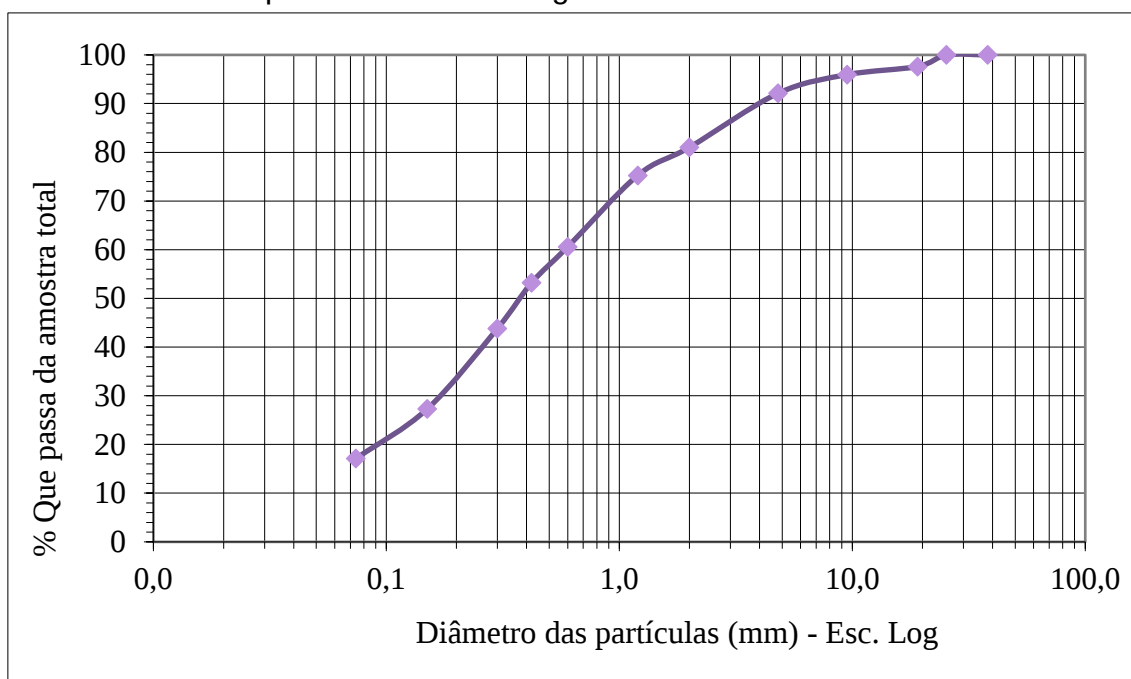
Apêndice 10 – Curva granulométrica da AD 03



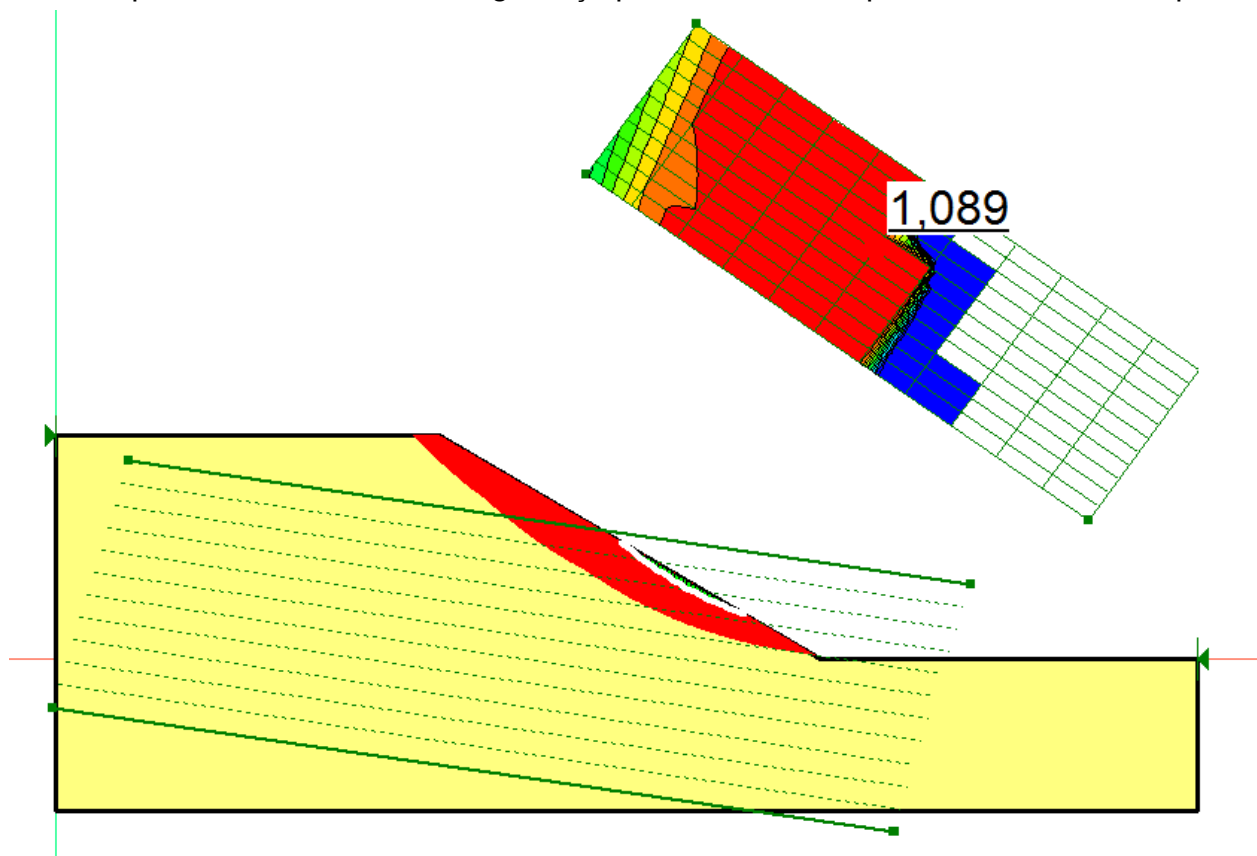
Apêndice 11 – Curva granulométrica da AD 04



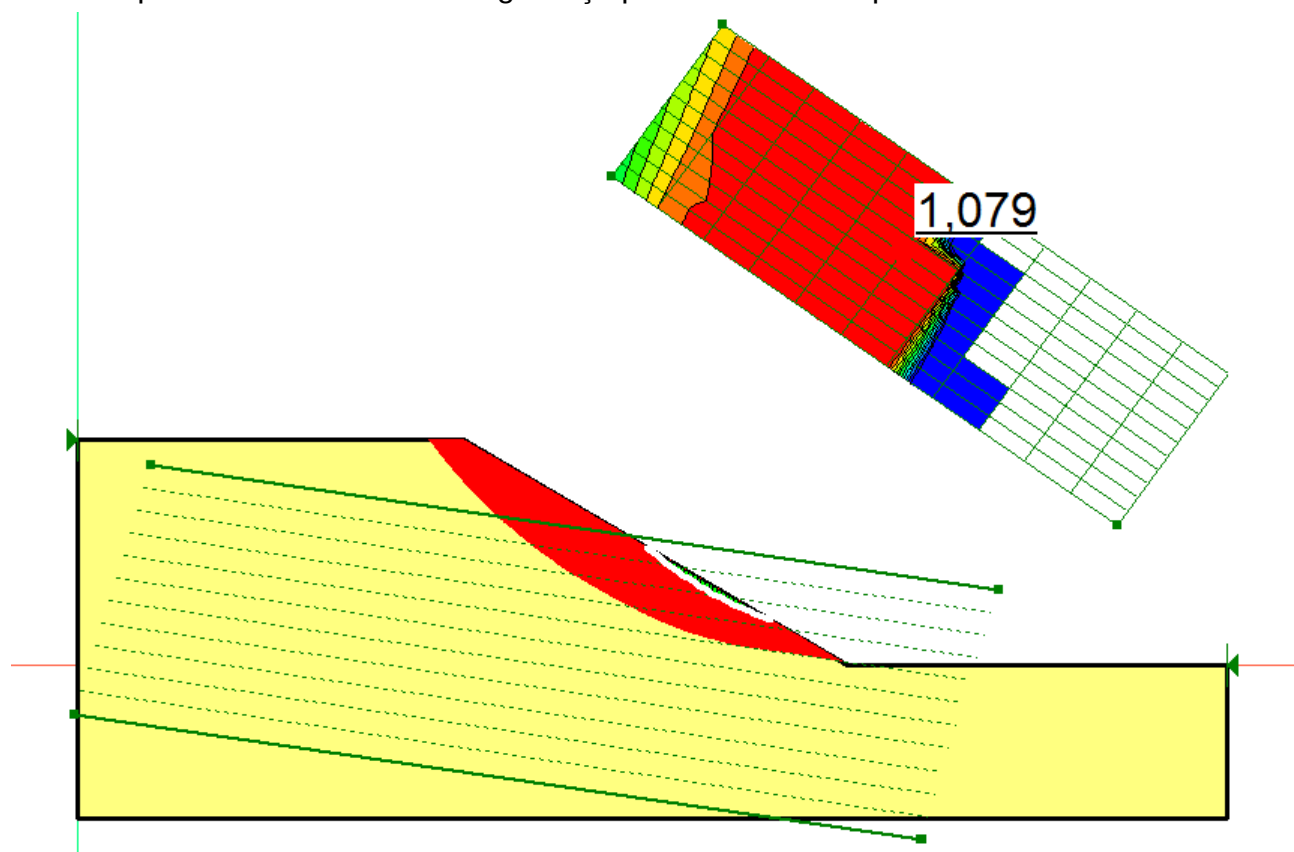
Apêndice 12 – Curva granulométrica da AD 05



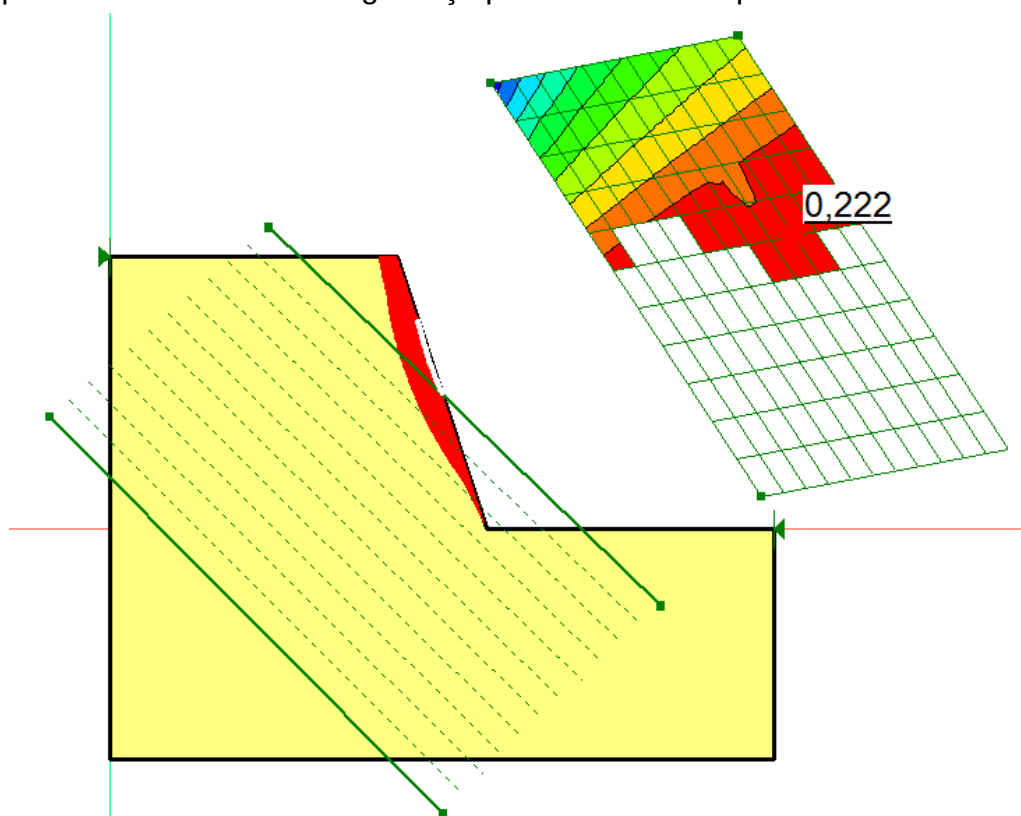
Apêndice 13 – Fator de Segurança para o Talude 02 pelo Método de Bishop



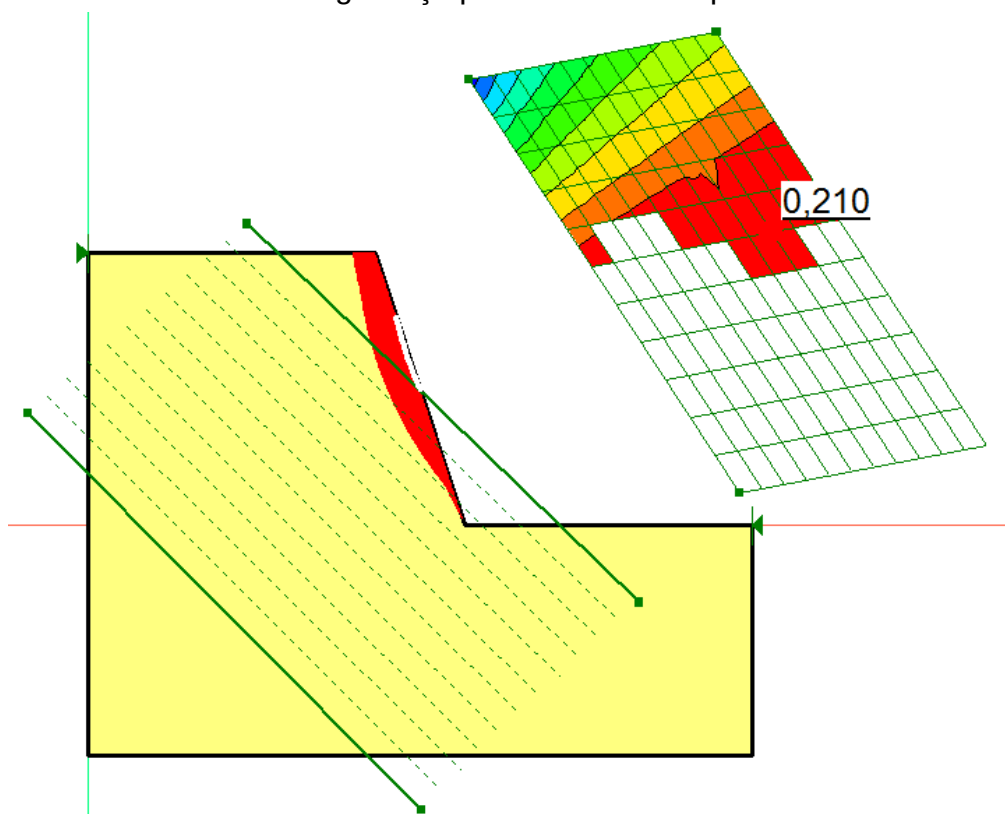
Apêndice 14 – Fator de Segurança para o Talude 02 pelo Método de Fellenius



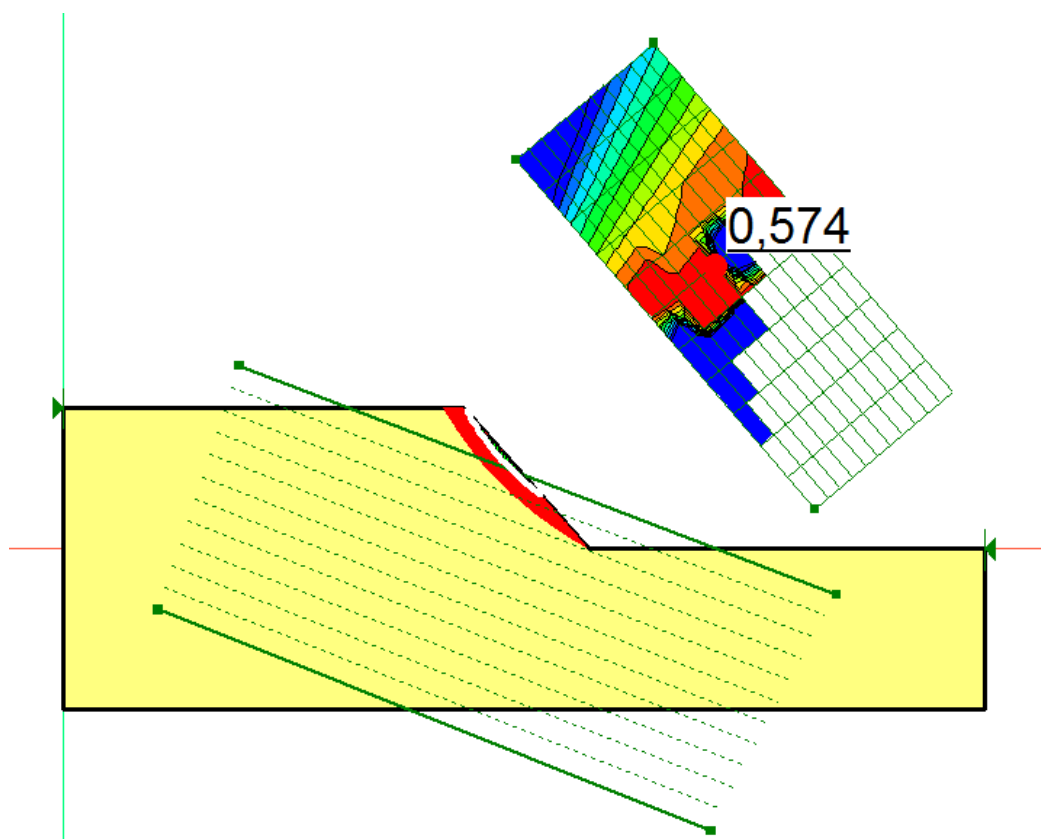
Apêndice 15 – Fator de Segurança para o Talude 03 pelo Método de Bishop



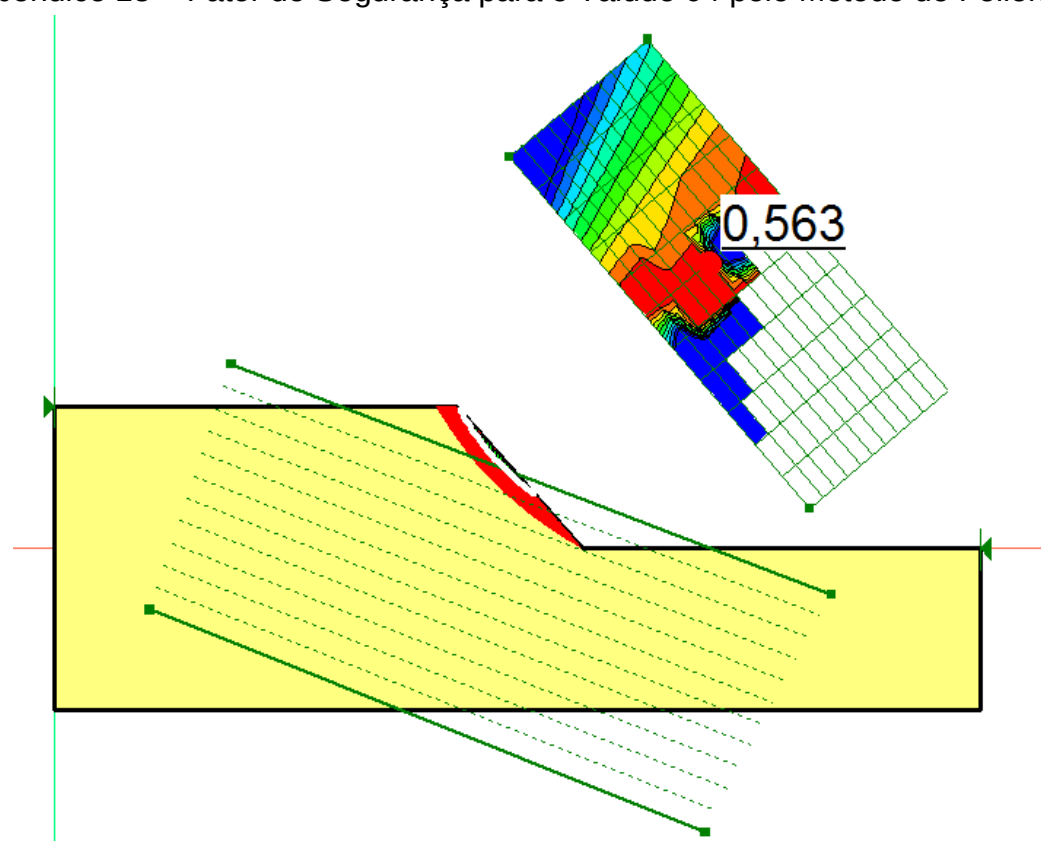
Apêndice 16 – Fator de Segurança para o Talude 03 pelo Método de Fellenius



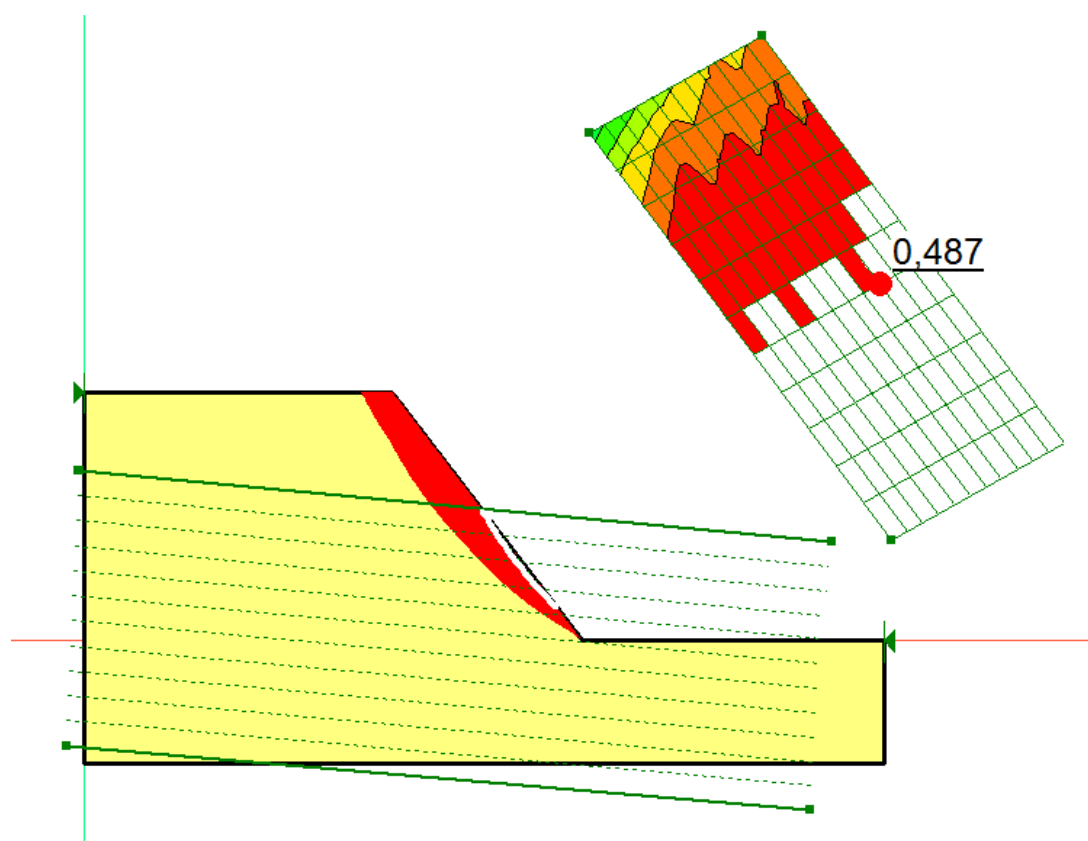
Apêndice 17 – Fator de Segurança para o Talude 04 pelo Método de Bishop



Apêndice 18 – Fator de Segurança para o Talude 04 pelo Método de Fellenius



Apêndice 19 – Fator de Segurança para o Talude 05 pelo Método de Bishop



Apêndice 20 – Fator de Segurança para o Talude 05 pelo Método de Fellenius

