

Proposta exploratória para o reforço dos solos de vias Moçambicanas com fibras de coco

PITA NAISSONE PITA JASSE
Outubro de 2023





Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Proposta exploratória para o reforço dos solos de vias Moçambicanas com fibras de coco

Pita Naissonne Pita Jasse



isep Instituto Superior de Engenharia do Porto

P. PORTO

2023

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Proposta exploratória para o reforço dos solos de vias Moçambicanas com fibras de coco

Exploratory proposal for reinforcing Mozambican road surfaces with coconut fibers

Pita Naissone Pita Jasse

1210168

*Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação do Doutor António Agostinho Mendonça, Professor Adjunto Convidado no Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé
Professor Coordenador com Agregação, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva
Professora Coordenador, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor António Agostinho Mendonça
Professor Adjunto Convidado, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi apresentada e defendida em prova pública, por **Pita Naissone Pita Jasse**, em 30 de Outubro de 2023 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **11 (onze) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

*Dedico esta dissertação a meu Pai Erminio Pita Jasse e a memória da
minha Avó Serenia Fuleza Malapuza que nos deixou...*

(página propositadamente em branco)

Agradecimentos

São devidos agradecimentos a todos professores do Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Instituto Superior de Engenharia do Porto, pelos conhecimentos transmitidos, pela paciência e disponibilidade em esclarecer toda e qualquer situação relacionada com o curso.

Ao meu orientador, Professor Doutor Agostinho Mendonça (DEG|ISEP), pela orientação e paciência, expresso o meu profundo e especial agradecimento.

Aos meus colegas do curso, especialmente ao Leandro Costa e à Inês Guedes, expresso também aqui o meu agradecimento por todo apoio que prestaram sempre que precisei.

(página propositadamente em branco)

Palavras-chave

Reforço, Fibras de Coco, Vias, Modelação Numérica

Resumo

Este trabalho visa avaliar as potencialidades das fibras de coco no melhoramento e estabilização de solos problemáticos, de modo a garantir a sua aplicação nas camadas de bases e aterros em obras rodoviárias em Moçambique. Para a análise, recorreu-se a modelação utilizando o software RS2 da RocScience concebido para simulação de diferentes cenários que podem ocorrer na realidade em obras de geoengenharias, sobretudo da engenharia geotécnica. Neste sentido, foi simulado o comportamento de solo argiloso e arenoso. Em ambos os tipos de solos, foi simulado comportamento do solo natural numa profundidade de 1.5 metros, com a camada superficial de 0.30 m melhorada com fibras de coco, e um aterro de 3 m com inclinações de taludes variáveis. No caso do solo argiloso, a análise foi feita sob duas condições distintas, ou seja, em estado saturado e não saturado. Em ambas condições do solo argiloso, foram utilizadas as proporções de 0.5%, 1% , 1.5% e 2% de resíduos de fibras de coco com comprimentos variáveis, correspondentes ao peso do solo natural. No caso do solo arenoso, foi utilizada uma mesma percentagem de 0.5% de fibras de coco com 25 mm e 50 mm, tendo sido produzidos modelos do comportamento do solo arenoso com 0.5% de fibras e 25 mm de comprimento e, 0.5% de fibras e 50 mm de comprimento. Da análise feita, constatou-se que, os teores de 0.5% e 1% de fibras são os que apresentaram resultados satisfatórios. Tendo por base esses efeitos propõe-se o reforço das obras de terra rodoviárias Moçambicanas por meio da reutilização de fibras de coco produzidas pela agroindústria local. Tal solução, além dos benefícios técnicos associados, irá incentivar a incorporação de um atual resíduo no ciclo produtivo contruindo assim para a dinamização da economia circular do país.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Reinforcement, Coconut Fibers, Roads, Numerical Modeling.

Abstract

This work aims to evaluate the potential of coconut fibers for improving and stabilizing problematic soils to guarantee their application in base layers and embankments in road works in Mozambique. For the analysis, modelling was carried out using RocScience's RS2 software, designed to simulate different scenarios that may occur in geoengineering works, especially in geotechnical engineering. The behavior of clay and sandy soils was simulated. For both types of soil, the behavior of the natural soil was simulated at a depth of 1.5 meters, with a 0.30 m surface layer improved with coconut fibers, and a 3 m embankment with variable slope inclinations. In the case of the clay soil, the analysis was carried out under two different conditions, i.e., in a saturated and unsaturated state. In both conditions of the clay soil, proportions of 0.5%, 1%, 1.5% and 2% of coconut fiber waste were used in varying lengths, corresponding to the weight of the natural soil. In the case of sandy soil, the same percentage of 0.5% coconut fibers of 25 mm and 50 mm was used, and models of the behavior of sandy soil with 0.5% fibers and 25 mm in length and 0.5% fibers and 50 mm in size were produced. The analysis showed that the 0.5% and 1% fiber contents gave satisfactory results. Based on these effects, it is proposed to reinforce Mozambican road embankments by reusing coconut fibers produced by the local agro-industry. This solution, in addition to the associated technical benefits, will encourage incorporating an existing waste product into the production cycle, thus helping to boost the country's circular economy.

(página propositadamente em branco)

Índice

CAPÍTULO I.	1
Introdução.....	1
1. Introdução.....	3
1.1. Contextualização.....	3
1.2. Motivações.....	5
1.3. Objetivos do trabalho.....	8
1.3.1. Objetivo geral.....	8
1.3.2. Objetivos específicos.....	8
1.4. Estrutura da dissertação.....	8
CAPÍTULO II.	11
Enquadramento do tema.....	11
2. Enquadramento do tema.....	13
2.1. Contextualização do país.....	13
2.1.1. Geografia.....	13
2.1.2. Geologia.....	14
2.1.3. Clima.....	16
2.2. Impactos nas infraestruturas viárias.....	16
2.3. Produção do coco.....	19
2.3.1. No mundo.....	19
2.3.1. Em Moçambique.....	21
2.4. Aproveitamento das fibras de coco.....	24
2.4.1. Generalidades.....	24
2.4.2. Aproveitamento das fibras de coco em moçambique.....	27
2.4.3. Proposta para aproveitamento das fibras de coco em Moçambique.....	29
CAPÍTULO III.	33
Reforço de solos com fibras de coco.....	33
3. Reforço de solos com fibras de coco.....	35
3.1. Introdução.....	35
3.2. Características dos solos aplicados em obras rodoviárias.....	38
3.2.1. Granulometria dos solos.....	38
3.2.2. Limites físicos ou de Atterberg.....	39
3.2.3. Compactação.....	41
3.2.4. Resistência ou CBR.....	42
3.3. Reforço e estabilização de solos com fibras.....	43
3.3.1. Influência das fibras no comportamento do solo.....	46
3.3.1.1. Influência das fibras na compactação.....	46
3.3.1.2. Influência das fibras na resistência de pico.....	47
3.3.1.3. Influência das fibras na resistência de pós-pico.....	47
3.3.1.4. Influência das fibras na deformabilidade.....	47

3.3.1.5.	Influência das fibras na variação volumétrica	48
3.3.1.6.	Influência das fibras na condutividade hidráulica	48
3.3.1.7.	Influência das fibras no modo de rotura	49
3.4.	Reforço de solos com fibras de coco	49
3.4.1.	Influência da adição de fibras de coco nas propriedades dos solos	50
3.4.2.	Avaliação do efeito da adição de fibras de coco nas estruturas	53
CAPÍTULO IV.	55
Avaliação numérica do reforço de solos com fibras		55
4.	Modelação do comportamento de solos melhorados com fibras de coco.....	57
4.1.	Programa RS2	57
4.2.	Procedimento de análise seguido	58
4.3.	Modelação numérica.....	59
4.3.1.	Definição dos parâmetros característicos	59
4.3.2.	Definição da carga de serviço.....	61
4.3.3.	Modelações numéricas	62
4.3.3.1.	Modelos do comportamento do solo argiloso não saturado	62
4.3.3.2.	Modelos do comportamento do solo argiloso saturado	63
4.3.3.3.	Modelos do comportamento do solo arenoso.....	63
4.3.4.	Modelos do comportamento dos aterros	64
4.4.	Análise dos resultados.....	67
4.4.1.	Influência das fibras de coco nos solos da camada da base do pavimento	67
4.4.1.1.	Solo argiloso não saturado	67
4.4.1.2.	Solo argiloso saturado	68
4.4.1.3.	Solo arenoso	69
4.4.2.	Influência das fibras de coco em aterros	70
4.4.2.1.	Aterros em solo argiloso não saturado.....	71
4.4.2.2.	Aterros em solo argiloso saturado.....	73
4.4.2.3.	Aterros em solo arenoso	76
CAPÍTULO V.	79
Considerações finais.....		79
5.	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	81
5.1.	Conclusões.....	81
5.2.	Aplicação das conclusões retiradas.....	83
5.3.	Desenvolvimentos Futuros.....	84
Referências bibliográficas.....		85
Referências Bibliográficas		87
Sítios da Internet Consultados		89
Anexos		91

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de Localização de Moçambique.....	13
Figura 2. As grandes divisões geológicas de Moçambique (elaborado por Gerson Guerreiro, a partir dos shapefiles do mapa geológico de Moçambique, 1:1.000.000).....	15
Figura 3. Rastos de destruição da estrada nacional nº 6 (EN6), algures na província de Sofala em Moçambique, após passagem do ciclone Idai em Março de 2019 (Fonte: https://www.publico.pt/2019/03/23/mundo/noticia/estrada-beiramaputo-reabre-domingo-ajuda-vai-comecar-chegar-depressa-1866576)	18
Figura 4. Situação de uma das principais estradas da província do Niassa (Moçambique) que dá acesso a um dos países vizinhos (Malawi), após passagem do ciclone Freddy em Março de 2023.....	18
Figura 5. Rastos de inundação e destruição de uma das estradas da província da Zambézia, após passagem do ciclone Freddy em Março de 2023.....	19
Figura 6. Evolução da produção e da área cultivada com coqueiro no mundo entre 1970 e 2014.	20
Figura 7. Variação da área de cultivo de coco em Moçambique nos anos de 2012 a 2021.	22
Figura 8. Variação da quantidade de coco produzida em Moçambique nos anos de 2012 a 2021.	23
Figura 9. Variação da produtividade do coco em Moçambique nos anos de 2012 a 2021.	23
Figura 10. Exemplos de variedade de coqueiro gigante (A) e coqueiro anão (B).	25
Figura 11. Síntese da morfologia do coco.	26
Figura 12. Exemplos de mantas de fibras de coco e algumas das suas aplicações na engenharia..	27
Figura 13. Exemplos de contentores para deposição de resíduos na cidade de Maputo (A) e cidade da Matola (B), em Moçambique.	28
Figura 14. Proposta para aproveitamento sustentável dos resíduos da casca de coco.	30
Figura 15. Solo arenoso utilizado no estudo.	52
Figura 16. Fibras de coco utilizadas no estudo (A – fibras em fardo; B – fibras desfiadas; C – fibras cortadas com 25 mm de comprimento; D – fibras cortadas com 50 mm de comprimento)	53
Figura 17. Procedimentos de análise do comportamento dos solos melhorados com fibras de coco.	58
Figura 18. Variação da tensão no solo argiloso não saturado, onde a camada superficial foi reforçada com 1% de fibras de coco.....	62
Figura 19. Variação da tensão no solo argiloso saturado, onde a camada superficial foi reforçada com 1% de fibras de coco.....	63
Figura 20. Variação da tensão no solo arenoso, onde a camada superficial foi reforçada com 0.5% de fibras de coco de 25 mm de comprimento.	64
Figura 21. Máxima deformação por corte em modelo de aterro simulado com solo argiloso não saturado e com taludes de 45°.	65
Figura 22. Máxima deformação por cisalhamento em modelo de aterro executado com solo argiloso não saturado, reforçado com 0.5% de fibras de coco e com taludes de 45°.....	65
Figura 23. Máxima deformação por corte do modelo de aterro simulado com solo argiloso saturado e taludes de 45°.....	65
Figura 24. Máxima deformação por corte do modelo de aterro simulado com solo argiloso saturado, reforçado com 0.5% de fibras de coco e com taludes de 45°.....	66
Figura 25. Máxima deformação por corte do modelo de aterro simulado com solo arenoso natural e taludes de 45°.....	66
Figura 26. Máxima deformação por corte do modelo de aterro simulado com solo arenoso reforçado com 0.5% de fibras de coco com 25 mm de comprimento, taludes de 45°.....	67
Figura 27. Influência das fibras de coco no assentamento e segurança da plataforma em solo argiloso não saturado.....	68
Figura 28. Influência das fibras de coco no assentamento e segurança da plataforma em solo argiloso saturado.....	69

Figura 29. Influência das fibras de coco no assentamento e segurança da plataforma em solo arenoso.....	70
Figura 30. Influência das fibras de coco no assentamento dos aterros em solo argiloso não saturado.	72
Figura 31. Influência das fibras de coco na estabilidade dos aterros em solo argiloso não saturado.	72
Figura 32. Influência das fibras de coco no assentamento dos aterros em solo argiloso saturado.	74
Figura 33. Influência das fibras de coco na segurança dos aterros em solo argiloso saturado	75
Figura 34. Influência das fibras de coco no assentamento dos aterros em solo arenoso.	77
Figura 35. Influência das fibras de coco na segurança dos aterros em solo arenoso.	77

Índice de quadros

Quadro 1. Alguns eventos extremos naturais que afetaram a parte continental do território moçambicano entre os anos 2019 e 2023	17
Quadro 2. Os principais países produtores de coco no mundo em 2014.....	21
Quadro 3. Produção de coco em Moçambique.	22
Quadro 2. Classificação geotécnica HRB (Highway Research Board) dos solos.....	40
Quadro 5. Um exemplo de resultados do estudo realizado por (F. Martins et al., 2022)	46
Quadro 6. Propriedades mecânicas das fibras de coco resultantes de diferentes estudos.	49
Quadro 7. Propriedades dos solos usados no estudo.	50
Quadro 8. Composição gravimétrica das fibras utilizadas no estudo.....	50
Quadro 9. Parâmetros de compactação das misturas.	51
Quadro 10. Parâmetros de compressibilidade e de resistência ao corte do solo puro e das misturas na condição não inundada	51
Quadro 11. Parâmetros de compressibilidade e de resistência ao corte do solo puro e das misturas na condição inundada	51
Quadro 12. Valores dos índices físicos do solo puro.....	52
Quadro 13. Principais características do solo puro e das misturas.....	53
Quadro 14. Parâmetros característicos do solo argiloso não saturado e das misturas solo-fibras.	60
Quadro 15. Parâmetros característicos do solo argiloso saturado e das misturas solo-fibras.....	60
Quadro 16. Parâmetros característicos do solo arenoso e das misturas solo-fibras.....	61
Quadro 17. Características de alguns veículos pesados de transporte de mercadorias e passageiros e a tensão máxima que exercem sobre o pavimento.	61
Quadro 18. Resultados do assentamento e fator de redução de corte dos modelos da plataforma em solo argiloso não saturado.	67
Quadro 19. Resultados do assentamento e fator de redução de corte dos modelos da plataforma em solo argiloso saturado.	69
Quadro 20. Resultados do assentamento e fator de redução de segurança dos modelos da plataforma em solo arenoso.	70
Quadro 21. Resultados do assentamento e fator de corte dos modelos dos aterros em solo argiloso não saturado e diferentes misturas.	71
Quadro 22. Resultados do assentamento e fator de corte dos modelos dos aterros em solo argiloso saturado e misturas com fibras.....	74
Quadro 23. Resultados do assentamento e fator de corte dos modelos dos aterros em solo arenoso e misturas com fibras.	76

(página propositadamente em branco)

Índice de fórmulas

Fórmula (1).....	38
Fórmula (2).....	39
Fórmula (3).....	40
Fórmula (4).....	40
Fórmula (5).....	61

(página propositadamente em branco)

Índice de acrónimos ou abreviaturas

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials (Associação Americana de Autoridades Estaduais de Rodovias e Transportes).

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura).

HRB – Highway Research Board (Conselho de Investigação Rodoviária).

ISRM – International Society for Rock Mechanics (Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas).

SRF – Strength reduction factor (factor de redução de resistência).

(página propositadamente em branco)

CAPÍTULO I.
Introdução

(página propositadamente em branco)

1. Introdução

A presente dissertação de mestrado enquadra-se no âmbito da unidade curricular Dissertação, do segundo ano do Curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG), do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), do Politécnico do Porto (P. Porto). A mesma tem o propósito de dar conclusão ao ciclo de estudos do corrente ano letivo 2022/2023 e de servir com objeto de obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente.

1.1. Contextualização

O solo é considerado um recurso natural inesgotável, porém no âmbito da engenharia civil esta afirmação é controversa, pois no contexto da caracterização geotécnica para efeitos de construção de qualquer obra de engenharia, nem sempre os terrenos dos locais a intervencionar oferecem as condições necessárias e/ou compatíveis com o projeto. No caso de construção de estradas, sendo obras lineares, é improvável não atravessar zonas com material incompatível com as solicitações de serviço da estrada. Daí, a necessidade de melhoramento das propriedades mecânicas dos solos destas zonas (com base nas reais solicitações de serviço projetadas), através de técnicas de tratamento in situ, para garantir não só a segurança e durabilidade das vias de comunicação, mas também, o aproveitamento sustentável e eficiente do solo local, evitando a sua substituição por solos provenientes de manchas de empréstimo.

Os solos, normalmente, são caracterizados pela sua fase sólida, enquanto as fases líquida e gasosa são consideradas conjuntamente como porosidade. Entretanto, na análise de comportamento real de um solo, há necessidade de se levar em conta as percentagens das fases componentes, bem como a distribuição dessas fases através da massa de solo (Bueno & Vilar, 1979). Os pavimentos rodoviários são constituídos por um conjunto de camadas horizontais, colocadas sobre uma fundação, que têm como função principal suportar as ações induzidas pelos veículos, redistribuindo as tensões transmitidas à fundação, proporcionando uma superfície segura e confortável para a circulação dos veículos (CEPSA, 2010). Usualmente, os pavimentos rodoviários são constituídos por camada de revestimento (camada de rolamento ou capa), camada de base, camada de sub-base e camada de reforço do subleito (DER/SP, 2012).

Desde os primórdios da civilização é reconhecida como essencial a necessidade de fundar adequadamente as infraestruturas construídas pelo homem, de modo a assegurar a longevidade e o bom funcionamento das mesmas, a médio ou longo prazo. Por isso, na antiga Babilónia, de uma

forma bastante rudimentar, já se utilizava madeira, bambu ou palha para reforçar o solo de fundação. Com o aumento do conhecimento dos solos e das suas propriedades mecânicas, para o qual fortemente contribuiu o desenvolvimento dos ensaios laboratoriais e dos ensaios in situ, o tratamento dos solos tem experimentado avanços significativos, existindo, hoje em dia, técnicas disponíveis que possibilitam a execução de estruturas em condições geológicas e geotécnicas particularmente adversas (Natário, 2017).

A realização de obras de engenharia sobre solos com características geotécnicas deficientes, torna-se, na maioria das vezes, inviável economicamente. Uma das alternativas que o engenheiro geotécnico dispõe para viabilizar técnica e economicamente a construção de obra, é melhorar as propriedades do solo existente, de modo a criar um novo material capaz de responder da melhor forma às exigências de um projeto. Dentro das técnicas de melhoramento de solos existentes, atualmente, destaca-se a estabilização por processos físico-químicos. Esta técnica (estabilização físico-química) é frequentemente utilizada no melhoramento do terreno de fundação superficiais assentes sobre solos com propriedades geotécnicas desfavoráveis e na execução de bases de pavimentos rodoviários (Rojas, 2015).

Além do exposto, o efeito das mudanças climáticas que se tem verificado nos últimos anos e que afeta os países de quase todo o mundo, faz com que as exigências com as obras de engenharia civil se tornem mais rigorosas no âmbito da sustentabilidade ambiental. Daí que, exige-se da sociedade, sobretudo profissionais dos ramos da engenharia civil, uma posição mais analítica com o meio ambiente, optando por soluções de construções resilientes e que minimizem o impacto na natureza e, conseqüentemente, promove-se deste modo a prática da economia circular.

Um tratamento pode ser proposto com vista à utilização in situ ou à utilização para aterro de um solo fino num estado muito húmido. O objetivo é, portanto, um efeito rápido no comportamento do solo que possibilite a circulação dos equipamentos de obra e a execução das terraplenagens, embora sem se pretenderem características mecânicas elevadas. Se se pretender utilizar esse mesmo solo numa camada estrutural de um pavimento, então, o objetivo do tratamento será a sua estabilização de modo a obter-se um ganho significativo das suas características mecânicas e de deformabilidade ou torná-lo insensível à água. Trata-se, neste caso, de uma alteração das propriedades do solo para o transformar num material estrutural. Em ambos os casos a escolha do agente de tratamento é função do tipo de solo, do seu estado hídrico e das condições atmosféricas existentes na altura do tratamento (Correia et al., n.d.).

A estabilização de solos com recurso ao uso de fibras (reforço de solos com fibras) é uma das técnicas mais antigas que já vem sendo utilizada pela humanidade desde há muito tempo. Neto et al. (2016) e Gonçalves et al. (2017), afirmam que algumas evidências do emprego desta técnica são encontradas em algumas estruturas antigas, por exemplo, as muralhas da Mesopotâmia (1400 a. C.), que ainda existem, foram construídas utilizando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes, em partes da Grande Muralha da China, onde foram utilizadas fibras vegetais e em estradas construídas pelos Incas no Peru, onde foi utilizada lã de lhama para reforçar os solos. Com o grande avanço tecnológico e as abordagens contemporâneas que conduzem à exigências da preservação do meio ambiente, cresce a necessidade de pesquisas de alternativas de tecnologias construtivas viáveis e que possam solucionar o problema de solos com baixa capacidade de suporte que, na maioria das vezes, não podem ser empregados em determinadas obras de engenharia civil. Deste modo, segundo (Trindade et al. (2004) citado por (Neto et al., 2016), uma das soluções que tem sido bastante estudada na atualidade é a estabilização do solo com fibras. Estudos realizados comprovaram que a adição de fibras ao solo promove o aumento da sua resistência à tração, sendo, por isso, viável a sua aplicação em vários setores da construção civil, como estabilização dos solos, pavimentação, terraplenos, entre outros.

Com este trabalho pretende-se analisar o comportamento de solos melhorados com fibras, e em particular com fibras de coco, e avaliar a sua aplicação em camadas de base e aterros rodoviários. Para isso, recorre-se ao software RS2 da Rocscience que é uma ferramenta de cálculo concebida para modelação de diversos cenários das geoengenharias, sobretudo da engenharia geotécnica. As conclusões da análise desenvolvida são suportadas em tais modelações numéricas do comportamento dos solos melhorados considerando diferentes percentagens de fibras de coco e/ou mesma percentagem de fibras mas com comprimentos variáveis.

1.2. Motivações

Atualmente, o maior desafio de todos os países do mundo é controlar ou minimizar os efeitos negativos das mudanças climáticas. Neste sentido, os engenheiros geotécnicos, na qualidade de profissionais vocacionados ao estudo do comportamento dos terrenos quando sobre os mesmos observa-se aplicação de tensões (através de fundações ou aterros), ou alívio de tensões (através das escavações), ou considerando o escoamento de águas nos seus vazios, associados a outras singularidades de cada terreno, estes profissionais devem aplicar as suas habilidades de modo a contribuir para a resolução dos problemas. Portanto, pode se afirmar que, além de adotar outro tipo de medidas com vista a minimizar ou eliminar a produção de gases de estufa no geral, do ponto

de vista da engenharia geotécnica, uma das medidas fundamentais para o sucesso deste desafio mundial, é adoção de soluções de melhoramento de solos adequadas aos recursos de cada realidade, de modo a garantir a resiliência e durabilidade das infraestruturas rodoviárias face aos fenómenos naturais (variações de temperaturas, cheias, inundações, ciclones, etc.) subjacentes às mudanças climáticas.

Pela sua localização geográfica, Moçambique é um país suscetível à fenómenos naturais. A principal motivação para desenvolvimento deste tema é a possibilidade da contribuição de soluções geotécnicas para o seu controlo. São frequentes arrastamentos e deslizamentos de solos das camadas de base estrutural, dos taludes e/ou da envolvente das infraestruturas rodoviárias que se tem verificado em quase todo mundo nos últimos anos. Dentre esses destaca-se particularmente os casos ocorridos em Moçambique, onde a situação tem sido dramática, pois os arrastamentos dos solos têm resultado em cortes de estradas e desabamentos de pontes que interrompem o tráfego rodoviário.

Partindo dessa necessidade propõe-se neste trabalho a possibilidade de controlo destes fenómenos por recurso a soluções de reforço suportadas em incorporação de fibras naturais oriundas da produção de coco moçambicana.

A estabilização de solos com recurso ao uso de fibras (reforço de solos com fibras) é uma das técnicas mais antigas que já vem sendo utilizada pela humanidade desde há muito tempo. Neto et al. (2016) e Gonçalves et al. (2017), afirmam que algumas evidências do emprego desta técnica são encontradas em algumas estruturas antigas. Por exemplo, as muralhas da Mesopotâmia (1400 a. C.), preservadas até à atualidade, foram construídas utilizando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes. Igualmente em partes da construção da Grande Muralha da China, foram utilizadas fibras vegetais e em estradas construídas pelos Incas no Peru foi utilizada lã de lhama para reforçar os solos. As abordagens contemporâneas de preservação do meio ambiente, têm conduzido à necessidade de pesquisas de alternativas de tecnologias construtivas viáveis e que possam solucionar o problema de solos com baixa capacidade de suporte e que, na maioria das vezes, não podem ser empregados em determinadas obras de engenharia civil. Neste enquadramento, segundo (Trindade et al. (2004) citado por (Neto et al., 2016), uma das soluções que tem sido estudada na atualidade é a estabilização do solo com fibras.

O reforço do solo com recurso a fibras faz parte das técnicas de melhoramento e estabilização física. A estabilização física do solo, pode ser classificada como parte da estabilização mecânica, onde as propriedades do solo são alteradas modificando-se sua textura, através do emprego de um ou mais

materiais, de modo a se enquadrarem dentro de uma determinada especificação. Como exemplos da técnica refere-se o caso da correção granulométrica ou a adição de fibras (metálicas, minerais, sintéticas ou vegetais), resultando dessa combinação de materiais, um terceiro produto que agrega as propriedades de suas fases constituintes, o qual dá-se o nome de material compósito (Pinto, 2008; Alencar et al., 2019). Assim, a estabilização física, comumente empregada no ramo das vias, é a técnica da modificação das propriedades do solo, principalmente na textura do mesmo, através da mistura de solos de diferentes frações granulométricas.

Um solo reforçado com fibras padrão é definido como uma massa de solo que contém elementos discretos distribuídos aleatoriamente, ou seja, fibras, que proporcionam uma melhoria no comportamento mecânico do material compósito denominado fibrossolo (Ates, 2016). Diversos estudos comprovaram que a incorporação de fibras no solo faz com que o mesmo tenha um comportamento particular quando comparado ao solo natural, ou seja, causa o aumento do atrito e coesão do solo, aumenta a sua resistência à tração e, conseqüentemente, aumenta a capacidade de carga e reduz a sua compressibilidade, visto que as fibras dissipam os esforços empregados ao solo (Neto et al., 2016).

O reforço de solos com fibras de coco tem sido objeto de vários estudos onde se comprova a sua eficácia. Segundo L. D. Gonçalves & Araújo (2015), as fibras de coco pertencem a família das fibras duras (com alto índices de rigidez e dureza), portanto, apresentam excelentes propriedades de durabilidade e resistência. Outrossim, as fibras de coco são ecológicas e com facilidade de reciclagem, o que faz delas um material com inúmeras opções de aplicação em várias áreas no atual contexto da economia circular.

Seguindo estas premissas avalia-se neste estudo a possibilidade de reutilização de fibras de coco das culturas moçambicanas na resolução dos problemas geotécnicos específicos do país já enunciados.

Moçambique foi um dos primeiros do grupo de países que cultivam o coco no mundo dispõe de plantações de coqueiros em todas regiões do país. Apesar de existirem algumas reutilizações para a casca de coco, esta continua a constituir um dos principais resíduos descartados de forma descontrolada em Moçambique. A proposta do presente trabalho pretende contribuir para o incremento da sua reutilização no ciclo económico local fomentando dessa forma a dinamização de uma economia circular associada ao produto.

1.3. Objetivos do trabalho

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar as potencialidades das fibras de coco para reforço e estabilização de solos da camada da base e dos aterros na pavimentação rodoviária.

1.3.2. Objetivos específicos

Com este trabalho pretende-se:

- i. Descrever o princípio de reforço e estabilização de solos com fibras para a sua utilização segura em obras de engenharia;
- ii. Propor um mecanismo para aproveitamento dos resíduos de fibras de coco em Moçambique;
- iii. Modelação do comportamento de uma plataforma rodoviária com camada superficial melhorada com diferentes teores e comprimentos de fibras;
- iv. Análise dos modelos produzidos com apuramento do teor de fibra de coco ótimo para fins de reforço e estabilização de solos para fins rodoviários.

1.4. Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em seis Capítulos. Apresenta-se em seguida, de forma sucinta todos os capítulos, referindo os aspetos mais importantes de cada um deles:

Capítulo I – Introdução

Este Capítulo serve de justificativa às motivações da atual dissertação. Faz referência ao conceito do tema escolhido e aos objetivos que o compõem.

Capítulo II – Enquadramento do tema

Neste Capítulo apresenta-se o enquadramento da produção de coco em Moçambique bem como o estado de reutilização dos seus derivados.

Capítulo III – Reforço de solos com fibras de coco

No terceiro Capítulo faz-se um enquadramento do estado da arte do reforço de solos com recurso a fibras e, em particular, a reforço com fibras de coco.

Capítulo IV – Modelação numérica

Tendo por referência as pesquisas bibliográficas efetuadas, neste quarto Capítulo procede-se à modelação numérica do efeito da incorporação de fibras nos solos com vista ao melhoramento do seu desempenho relativamente ao estado natural.

Capítulo V – Considerações finais

Neste último Capítulo esboçam-se as conclusões e as respostas obtidas no decurso da pesquisa e aplicação prática da problemática. No final fazem-se algumas referências a possíveis desenvolvimentos futuros e aplicações deste tipo de técnica.

(página propositadamente em branco)

CAPÍTULO II.
Enquadramento do tema

(página propositadamente em branco)

de Maputo na província de Maputo. As estradas mais frequentadas por automóveis pesados de mercadorias são as Estradas Nacionais EN1, EN4 e EN6.

2.1.2. Geologia

Conforme foi referido na secção anterior, Moçambique está dividido em três grandes regiões territoriais (Norte, Centro e Sul), onde os fatores como a rocha mãe, o clima, os organismos vivos, o relevo, entre outros que se verificam em cada região, determinam a formação e/ou ocorrência dos tipos de solos.

Na maior parte da região norte de Moçambique predominam os solos argilosos avermelhados, cuja principal característica é a sua vulnerabilidade a erosão. Além destes, verifica-se também a ocorrência de solos argilosos vermelhos e castanhos profundos, ambos com algum grau de drenagem e resistência a erosão. No litoral dessa região verifica-se uma alteração dos solos, visto que os solos arenosos de dunas costeiras e fluviais são os mais comuns. Na região centro, de um modo geral, predominam os solos de textura média, com mistura de argila e areia, ou seja, franco argilosos arenosos, porém, verifica-se ocorrência de solos com mistura de argila e areia no sul da província de Tete. Na região sul, os solos predominantes são arenosos com baixa capacidade de retenção de água e conseqüentemente boa drenagem, intercalados com solos arenosos (brancos) de origem fluvial e marinha (ver Figura 2).

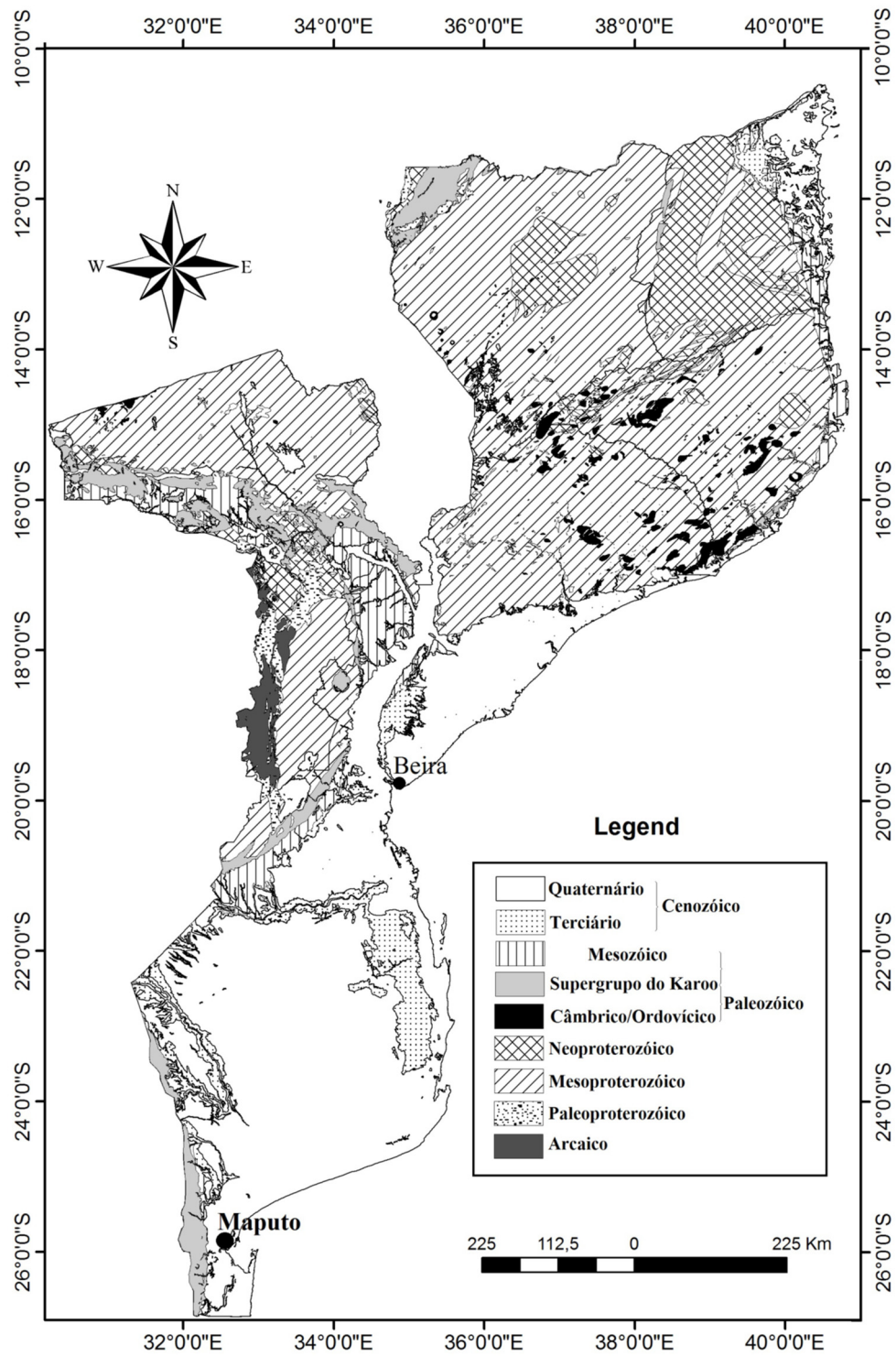


Figura 2. As grandes divisões geológicas de Moçambique (elaborado por Gerson Guerreiro, a partir dos shapefiles do mapa geológico de Moçambique, 1:1.000.000). (Vasconcelos, 2014).

2.1.3. Clima

Pela sua localização geográfica, Moçambique é um país suscetível à fenómenos naturais, principalmente inundações, devido por um lado às chuvas intensas que se tem verificado nos últimos anos e, por outro lado, pelo fato de ser atravessado por vários rios. A maior parte das estradas moçambicanas estão localizadas nas bacias hidrográficas desses rios, por conseguinte, são vulneráveis ao arrastamento de solos e consequentes cortes, interrompendo o tráfego rodoviário e impossibilitando o escoamento da produção agropecuária das zonas rurais para os centros urbanos.

Apesar dos fenómenos naturais (sobretudo a seca) serem históricos em Moçambique, devido a regularidade com que o país lida com eventos severos, principalmente cheias e tempestades tropicais durante a estação chuvosa nos últimos 10 anos, o país é atualmente considerado um dos que mais sofre o efeito das mudanças climáticas. Por exemplo, só nos últimos 5 anos (2019 a 2023), o território Moçambicano, foi afetado por vinte tempestades tropicais, das quais treze afetaram diretamente a parte continental do país e, dessas, nove atingiram o nível de ciclones de categorias variáveis, como se pode ver no Quadro 1. Além dos treze eventos extremos que afetaram a parte continental de Moçambique apresentados no Quadro 1, os outros sete eventos também foram de grande magnitude, mas apenas afetaram a parte costeira do território, não tendo causado nenhum tipo de dano.

2.2. Impactos nas infraestruturas viárias

Nos últimos dez anos, o ciclone Idai foi o fenómeno mais severo que ocorreu em Moçambique e, portanto, o mais devastador tanto em termos de vidas humanas, assim como destruição de infraestruturas sociais, dentre as quais destaca-se a Estrada Nacional Nº 6 (N6) que atravessa as Províncias de Manica e Sofala, também conhecida por corredor da Beira, pois permite aos condutores de automóveis pesados de mercadorias de alguns países vizinhos (Malawi, Zâmbia e Zimbabwe), o acesso ao Porto da Beira para exportação das suas mercadorias e, carregamento de diversos produtos importados e transportados via marítima. O Idai causou danos severos em todas as províncias afetadas, porém, a destruição de estradas verificou-se com maior gravidade na Província de Sofala, como se pode ver na Figura 3.

Quadro 1. Alguns eventos extremos naturais que afetaram a parte continental do território moçambicano entre os anos 2019 e 2023 (<https://www.dadosmundiais.com/africa/mocambique/ciclones.php>).

Designação da Tempestade Tropical	Período de Ocorrência	Velocidade Máxima (km/h)	Velocidade Máxima Sobre a Terra (km/h)	Províncias Afetadas	Região do País
Desmond	17 a 22 de Janeiro de 2019	83	65	Zambézia e Inhambane	Centro e Sul
Ciclone Idai	4 a 16 de Março de 2019	213	185	Niassa, Nampula, Zambézia, Manica e Sofala	Norte e Centro
Ciclone Kenneth	21 a 28 de Março de 2019	226	102	Cabo Delgado	Norte
Ciclone Chalane	20/12/2020 a 04/01/2021	124	111	Zambézia, Manica e Sofala	Norte e Centro
Ciclone Eloise	11 a 27 de Janeiro de 2021	157	148	Nampula, Zambézia, Sofala e Gaza	Norte, Centro e Sul
Ciclone Guambe	11 a 22 de Fevereiro de 2021	161	37	Sofala, Inhambane e Gaza	Centro e Sul
Iman	2 a 11 de Março de 2021	87	65	Nampula	Norte
Ana	23 a 25 de Janeiro de 2022	93	93	Nampula e Tete	Norte e Centro
Ciclone Gombe	8 a 14 de Março de 2022	183	183	Niassa, Nampula e Tete	Norte e Centro
Jasmine	24 a 28 de Abril de 2022	100	65	Nampula e Zambézia	Norte e Centro
Ciclone Cheneso	17 a 29 de Janeiro de 2023	148	65	Nampula	Norte
Ciclone Freddy	6 a 24 de Fevereiro de 2023	256	111	Inhambane	Sul
Ciclone Freddy	2 a 14 de Março de 2023	183	172	Niassa, Nampula, Zambézia e Tete	Centro



Figura 3. Rastos de destruição da estrada nacional nº 6 (EN6), algures na província de Sofala em Moçambique, após passagem do ciclone Idai em Março de 2019 (Fonte: <https://www.publico.pt/2019/03/23/mundo/noticia/estrada-beiramaputo-reabre-domingo-ajuda-vai-comecar-chegar-depressa-1866576>)

Como já foi referido, os eventos severos, sobretudo tempestades tropicais, tem ocorrido de forma cíclica em Moçambique e, com base nos fenómenos ocorridos nos últimos cinco anos, recorrendo a estatística básica, percebe-se que Moçambique registou em média 4 tempestades tropicais por ano. Quando enquadrámos estes fenómenos com as características geológicas ocorrentes na generalidade do país constata-se que urge a necessidade de adotar medidas de precauções para eventos futuros e/ou soluções de problemas de engenharia já existentes como seja o do impacto daqueles na estabilidade das infraestruturas rodoviárias (ver Figuras 4 e 5).



Figura 4. Situação de uma das principais estradas da província do Niassa (Moçambique) que dá acesso a um dos países vizinhos (Malawi), após passagem do ciclone Freddy em Março de 2023.



Figura 5. Rastos de inundação e destruição de uma das estradas da província da Zambézia, após passagem do ciclone Freddy em Março de 2023.

Deste modo, o reforço de solos com fibras de coco produzidas localmente pode constituir uma opção técnico-económica de grande utilidade na prevenção de arrastamentos de solos e consequentes cortes de estradas, quando aplicadas de forma criteriosa no melhoramento de solos de bases e aterros de pavimentos rodoviários.

2.3. Produção do coco

2.3.1. No mundo

O coqueiro, do qual provêm o coco (*Cocos nucifera* L.) é uma palmeira da espécie monocotiledônea da família *Arecaceae*, geralmente produzida nas regiões tropicais (entre os paralelos 23°N e 23°S), onde existem condições adequadas para o seu cultivo tais como, solos arenosos, radiação solar intensa, boa variabilidade da precipitação e boa humidade. De acordo com registos históricos, é provável que a produção do coco tenha começado na Índia, Sri Lanka e países do sudeste da Ásia (Malásia, Filipinas e Indonésia), e de seguida passou a ser produzido em Moçambique, depois passou para Malásia e Costa do Marfim, e mais tarde, o Brasil e outros países do mundo (NETO et al., 2010; C. R. Martins & Junior, 2014; Santana et al., 2020). No Brasil por exemplo, o coco foi introduzido pela primeira vez na Bahia em 1553, abordo das embarcações portuguesas provenientes das ilhas de Cabo Verde, ou seja, o cultivo do coco no Brasil só teve início com a chegada de escravos africanos especialmente aqueles originários de Moçambique, onde o cultivo, extração e aproveitamento do coco já era comum (NETO et al., 2010).

De acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) citada por C. R. Martins & Junior (2014), em termos globais, o cultivo mundial do coqueiro registou acréscimo tanto na área de plantação, bem como na produção. Em 1970, a produção mundial foi em torno de 26 milhões de toneladas, para uma área colhida de 6.7 hectares. Estes números foram aumentando

de forma expressiva com o passar do tempo, chegando a alcançar em 2000, uma produção de 51 milhões de toneladas numa área de 10 milhões de hectares. Em 2014, a produção mundial do coqueiro situava-se em torno de 60 milhões de toneladas numa área de 12 milhões de hectares. Como se pode observar na Figura 6, apesar de se ter verificado o acréscimo na área cultivada, o que está mais evidente a partir dos anos 90 é o incremento expressivo da produção do coco resultante do aprimoramento das tecnologias e sistemas de cultivo, refletindo-se num avanço significativo da produtividade global.

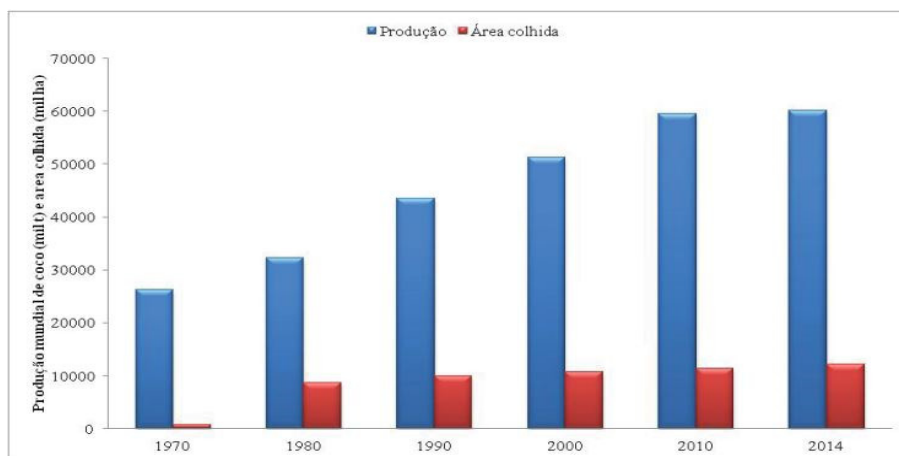


Figura 6. Evolução da produção e da área cultivada com coqueiro no mundo entre 1970 e 2014.

Fonte: C. R. Martins & Junior (2014)

De acordo com C. R. Martins & Junior (2014), até o ano 2014, os países da Ásia, sobretudo a Índia, Filipinas Indonésia, Sri Lanka e Tailândia, tinham a maior área de plantações de coqueiro no mundo, cobrindo uma área aproximada de 70% da área mundial, sendo que, a outra parte (cerca de 30% da área de plantação de coqueiro) se distribuía entre os países do continente africano, América Latina, Oceânia e Caribe. Estes autores, sublinham que ainda no mesmo período (2014), a Indonésia destacava-se como o maior produtor mundial de coco, seguido por Filipinas e Índia. Porém, as Filipinas tinham mais de 500 mil hectares de plantações de coqueiro, ou seja, as Filipinas destacavam-se com a maior área cultivada do mundo à frente da Indonésia. Apesar disso, importa salientar o avanço registado no Brasil em relação ao cultivo do coco, pois passou da 10ª posição ocupada em 1990 no ranking mundial, com uma produção em torno das 477 mil toneladas de coco, para a 4ª posição do ranking mundial em 2014, com uma produção de cerca de 2.8 milhões de toneladas de coco, numa área de 257 mil hectares de produção de coqueiros. Com esses registos, percebe-se a grande evolução da produção do coco no Brasil, o qual passou a liderar o ranking dos países com maior rendimento em termos de produtividade, ou seja, o Brasil passou a produzir mais quantidade de coco numa área relativamente menor (comparado aos outros países) fixando, em média, uma produção de 11 toneladas de coco por hectare, como se pode ver no Quadro 2.

Quadro 2. Os principais países produtores de coco no mundo em 2014.

País	Área Colhida (ha)	Produção (1000 ton)	Produtividade (1000 ton/ha)
Indonésia al	3,000,000	18,000,000	6.00
Filipinas	3,573,806	15,862,386	4.44
Índia	2,132,240	10,560,000	4.95
Brasil	257,742	2,888,532	11.21
Sri Lanka	394,84	2,000,000	5.07
Vietnam	145,000	1,250,000	8.62
Tailândia	217,000	1,100,000	5.07
México	166,000	1,050,000	6.33
Papua Nova Guine	223,000	900,000	4.04
Malásia	112,093	606,53	5.41
Outros	1,892,920	5,831,389	3.08
Mundo	12,114,141.37	60,048,837.15	4.96

(Fonte: C. R. Martins & Junior, 2014).

Com base na evolução que o Brasil teve de 1990 a 2014, importa referir que atualmente, passados cerca de 10 anos (2014 a 2023), esta tendência de produção de coco pode ter evoluído e/ou iniciado em outros países do mundo.

2.3.1. Em Moçambique

Conforme atrás descrito Moçambique foi um dos primeiros produtores do grupo de países que cultivam o coco no mundo, embora em plantações relativamente menores comparado com alguns países da Ásia e América do Sul. Atualmente, Moçambique dispõe de plantações de coqueiros em todas regiões do país, ou seja, pelo menos uma província de cada região (norte, centro e sul) produz coco. Até ao ano de 2010 as plantações de coco cobriam, ao todo, cerca de 160.000 hectares de terras, distribuídas entre as províncias de Cabo Delgado e Nampula na região norte, Zambézia na região centro e Inhambane na região sul do país.

De acordo com dados da FAO disponíveis no sítio <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>, a área de plantação de coqueiros em Moçambique nos últimos anos tem variado bastante, afetando assim a produção e a produtividade do setor. Para ilustrar essas variações, com base nos dados atualizados da FAO (dados de Março de 2023) apresentados no Quadro 2, elaboraram-se os gráficos das Figuras 7 a 9 correspondentes à variação da área de cultivo, quantidade produzida e produtividade, respetivamente, num período de 10 anos, ou seja, de 2012 a 2021.

Quadro 3. Produção de coco em Moçambique.

Ano	Área cultivada (ha)	Produção (ton)	Produtividade (ton/ha)
2012	84000	270000	3.21
2013	83000	260000	3.13
2014	81212	245990	3.03
2015	88047	252012	2.86
2016	85714	252667	2.95
2017	82341	239077	2.90
2018	85368	247919	2.90
2019	84474	246554	2.92
2020	84061	244517	2.91
2021	84634	246330	2.91

(Fonte: FAO, 2023)

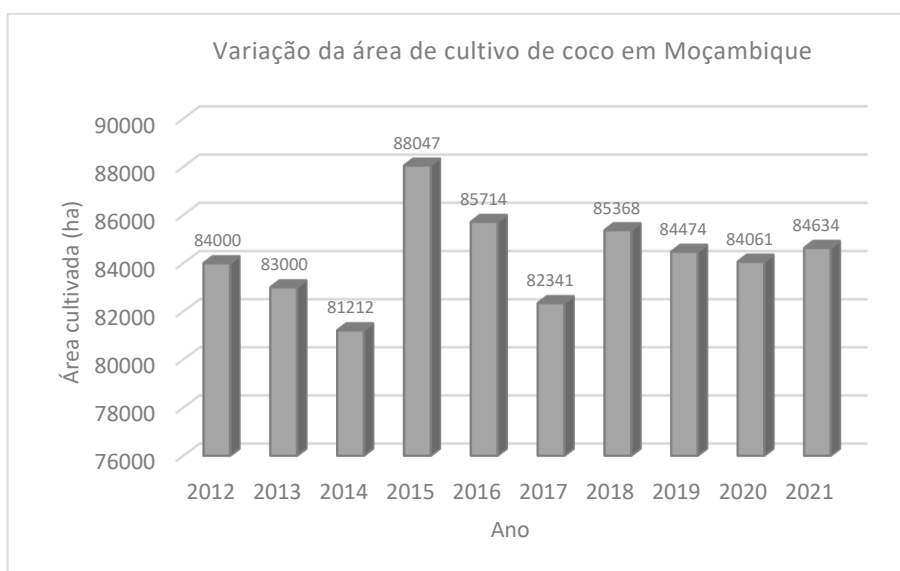


Figura 7. Variação da área de cultivo de coco em Moçambique nos anos de 2012 a 2021.

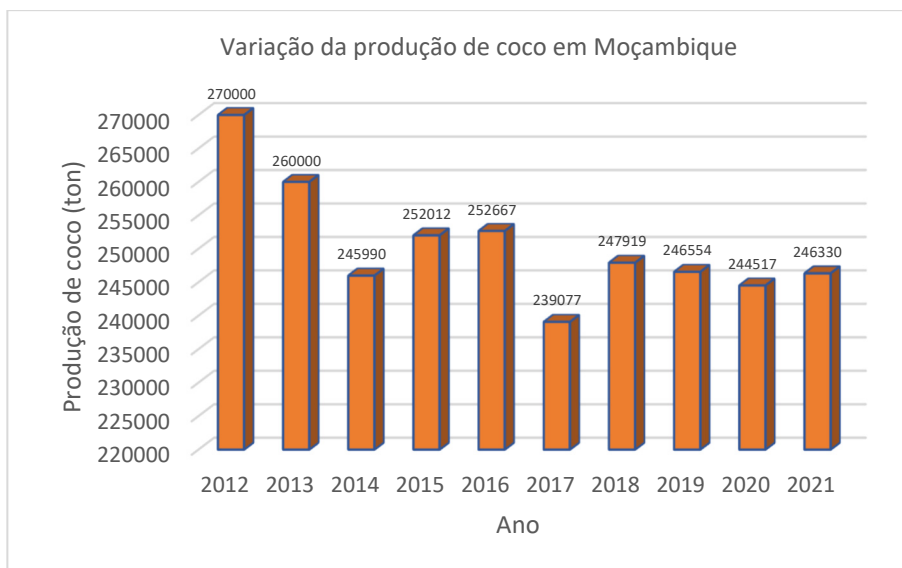


Figura 8. Variação da quantidade de coco produzida em Moçambique nos anos de 2012 a 2021.

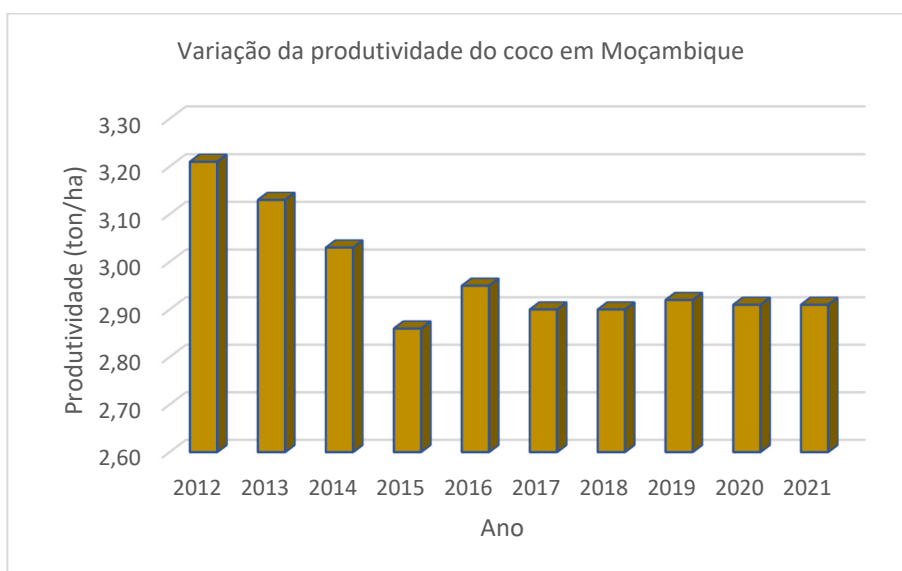


Figura 9. Variação da produtividade do coco em Moçambique nos anos de 2012 a 2021.

Em 2022, o Grupo Madal S.A.R.L (uma empresa sediada na província da Zambézia), que atua no ramo agroindustrial, no âmbito de um projeto de exploração do potencial de produção e comercialização de coco na província da Zambézia inserido nas suas atividades, iniciou um processo de renovação das plantações de coqueiros em cinco distritos daquela província, nomeadamente: Chinde, Inhassunge, Maganja da Costa, Nicoadala e Pebane, nos quais estava previsto renovar ao todo 31.000 hectares de plantações de coqueiros. Para a implementação deste projeto de repovoamento dos coqueiros, o grupo conta com a parceria da Universidade do Zambeze localizada na mesma província, através de um convénio assinado em Julho de 2022 que envolve alunos e

professores dos cursos de engenharia agronómica e florestal. Importa salientar que em tempos, a província da Zambézia já teve um dos maiores palmares do mundo.

2.4. Aproveitamento das fibras de coco

2.4.1. Generalidades

Segundo NETO et al. (2010) e Santana et al. (2020), os coqueiros podem ser encontrados em três variedades, a saber: coqueiro gigante, coqueiro anão e coqueiro híbrido, sendo que a última variedade é resultante do cruzamento das duas primeiras. As variedades do coqueiro gigante e do coqueiro anão são as mais importantes do ponto de vista agroindustrial e socioeconómico. Por isso são as mais cultivadas no mundo. De acordo com Santana et al. (2020), o coqueiro gigante cresce rápido, porém com uma fase de florescimento longa, podendo demorar entre 5 a 7 anos para florescer e pode atingir até 30 metros de altura. Essa variedade (coqueiro gigante) não produz boa água de coco e é indicada para fabricação de coco ralado, leite de coco e seus derivados, incluindo as fibras de coco (NETO et al., 2010). Por sua vez, a variedade do coqueiro anão pode atingir cerca de 3 metros de altura, possui uma fase de florescimento mais curta que pode variar entre 2 a 3 anos e, é indicada para a extração de água de coco e mais usos na culinária, artesanato, medicina e cosmética, porém não é propícia para extração da polpa (NETO et al., 2010; Santana et al., 2020). De um modo geral, a maior parte dos países cultivam o coqueiro para produção de frutos e posterior exploração comercial da copra para produção de óleo, coco seco desidratado, coco ralado, leite de coco e água de coco. Além dos ganhos económicos que esta palmeira proporciona através dos seus frutos, também proporciona ganhos socioambientais em muitos países através da sua exploração sustentável (C. R. Martins & Junior, 2014).



Figura 10. Exemplos de variedade de coqueiro gigante (A) e coqueiro anão (B).

(Fontes: <https://www.floresefolhagens.com.br/coqueiro-cocos-nucifera/>;
<https://casavogue.globo.com/arquitetura/paisagismo/noticia/2021/03/como-cultivar-coqueiro-anao-no-jardim.ghtml>.)

O coco é um fruto carnoso que apresenta apenas uma semente, é formado por uma casca lisa (exocarpo), a qual envolve uma camada intermediária fibrosa e espessa denominada mesocarpo, e mais internamente, a seguir ao mesocarpo, encontra-se uma camada dura que envolve a semente, a qual é denominada por endocarpo. A semente é formada por uma camada fina e castanha, abaixo da qual fica uma camada carnosa de coloração branca e oleosa denominada por endosperma sólido e por fim, na semente observa-se uma cavidade onde fica um líquido branco, ou seja, endosperma líquido, comumente conhecido por água de coco. A Figura 11 ilustra as diferentes camadas que compõem o coco.

As fibras de coco são aproveitadas das camadas do exocarpo e do mesocarpo (casca do coco). Segundo L. D. Gonçalves & Araújo (2015), as fibras de coco pertencem à família das fibras duras (com alto índices de rigidez e dureza), portanto, apresentam excelentes propriedades de durabilidade e resistência. Outrossim, as fibras de coco são ecológicas e com facilidade de reciclagem, o que faz delas um material com inúmeras opções de aplicação em várias áreas no atual contexto da economia circular.



Figura 11. Síntese da morfologia do coco.

(Fonte: Santana et al., 2020)

Pelas características expostas, de todos os derivados do coco já referidos, as fibras são as que têm sido mais utilizadas ultimamente para vários fins, desde usos domésticos relativamente simples, aos usos relativamente mais complexos para resolução de alguns problemas de engenharia. Dentre as aplicações das fibras do coco destaca-se o seu uso para fabrico de mantas de fibras de coco, ou seja, geotêxtis constituídos 100% por fibras de coco. As mantas orgânicas naturais resultantes, são destinadas para diversos usos, como por exemplo, na drenagem de jardins, paisagismo, decoração de ambientes internos de uma casa, revestimento de paramentos de muros de solo reforçado, estabilização e proteção superficial de taludes e margens fluviais contra a erosão dos solos, selagem de aterros sanitários, estabilização de dunas, bem como na formação de vasos e placas em substratos promovendo o aumento da porosidade e retenção de água. Em alguns casos, sobretudo em aplicações de engenharia, quando for necessário, as mantas de fibras de coco são reforçadas por redes sintéticas que promovem o aumento da resistência à tração das mantas.



Figura 12. Exemplos de mantas de fibras de coco e algumas das suas aplicações na engenharia.

(Fonte: <https://www.ntcbrasil.com.br/mantas/biomanta-fibra-de-coco/>)

Obviamente, a maximização do aproveitamento do coco verifica-se quando, o recurso a processos manuais ou utilização de máquinas apropriadas possibilita a separação do coco entre fibras, pó e líquido, resultando em várias possibilidades de aplicações em diferentes áreas. A biodegradação da casca do coco demora aproximadamente entre 10 a 15 anos, e se esse resíduo for descartado e acumulado em lugares inadequados e de forma descontrolada, pode favorecer a disseminação de doenças tropicais transmitidas por vetores e/ou sobrecarregar os aterros sanitários (NETO et al., 2010). Assim, devido à grande disponibilidade e baixo custo das fibras de coco, tem-se tornado cada vez mais evidente a necessidade de apurar as potencialidades que elas têm para melhoramento das propriedades mecânicas para fins de engenharia (Júnior et al., 2018). Por isso, algumas pesquisas foram desenvolvidas com objetivo de compreender a influência da inclusão de fibras no solo.

2.4.2. Aproveitamento das fibras de coco em moçambique

Atualmente, em Moçambique, o processamento da casca do coco é feito pela Conut Organics, uma filial da empresa de sabão sediada na província de Inhambane a Saboeira de Inhambane e, opera na cidade de Maputo, especificamente no recinto do Porto de Maputo. Vale a pena referir que a camada mais externa da casca do coco produzido em moçambique é destinada à produção de Conut Zorb, ou seja, uma serradura resultante da mistura do pó da casca do coco e outros vegetais, mediante um processo que lhe confere qualidades absorventes. O Conut Zorb é um produto orgânico e biodegradável que não traz nenhum impacto negativo ao ambiente. É um absorvente de materiais inflamáveis ou tóxicos, utilizado para a biorremediação de solos ou água contaminados por derivados de hidrocarbonetos, tais como combustíveis e outros produtos químicos. No seu processo de beneficiamento do coco, a empresa Saboeira de Inhambane, também utiliza as fibras

do coco para produção de esteiras especiais utilizadas no fabrico de colchões, bem como na área agrícola para produção de adubos orgânicos e de mudas nas estufas.

Apesar destas utilizações, a casca de coco continua a constituir um dos principais resíduos descartados de forma descontrolada em Moçambique, pois grande parte do coco produzido no país não é vendido ao sector industrial, mas sim em mercados locais, facto que contribui para a deposição descontrolada deste resíduo. Outrossim, Moçambique não possui nenhum aterro sanitário e os resíduos, independentemente do tipo, sendo depositadas nos poucos contentores metálicos existentes em alguns pontos das principais cidades do país, e depois são recolhidos para a sua deposição em lixeiras a céu aberto. Em zonas rurais, onde não existem contentores, e muito menos lixeiras, este resíduo é descartado em locais impróprios e abandonado até à sua total decomposição ou, em alguns casos, é utilizado como combustível, poluindo o ambiente com o fumo. Na Figura 13 estão apresentados 2 exemplos de como são depositados os resíduos, independentemente do tipo, em quase todos centros urbanos de Moçambique.



Figura 13. Exemplos de contentores para deposição de resíduos na cidade de Maputo (A) e cidade da Matola (B), em Moçambique.

(Fonte: <https://opais.co.mz/moradores-da-cidade-de-maputo-questionam-finalidade-da-taxa-de-lixo/>)

Essas realidades, tanto em zonas rurais, bem como nos centros urbanos, propiciam a proliferação de mosquitos, principais vetores da malária em Moçambique. Posto isto, fica evidente que a utilização de fibras de coco, mais do que contribuir para soluções de engenharia, poderá reduzir sobremaneira a quantidade de resíduos produzidos principalmente nas regiões onde ocorre a produção deste fruto. Consequentemente, contribuirá para minimizar a proliferação de mosquitos causadores da malária, uma das principais causas de mortes no país. Além disso, outro facto mais importante, é que com a reutilização das fibras de coco irá promover a economia circular, um tema contemporâneo que tem merecido muita atenção em todo mundo, devido à sua importância na preservação do meio ambiente e otimização dos recursos.

Importa referir que, de acordo com Lacerda & Leitão (2021) o conceito de economia circular é relativamente novo. Foi sugerido pela primeira vez na China em 1998 e, só no ano 2002 foi oficialmente reconhecido pelo governo Chinês como nova abordagem com vista a resolver o problema de desequilíbrio entre o rápido crescimento económico e a escassez de recursos naturais, matéria-prima e energia. Este quadro só se pode reverter através da minimização de resíduos, manutenção, reutilização e reciclagem a longo prazo, promovendo deste modo, benefícios sociais, económicos e sobretudo ambientais. Desde então, a economia circular tornou-se uma agenda importantíssima no mundo inteiro incluindo Moçambique, apesar de ser um dos países menos industrializados.

Posto isto, a necessidade de encontrar um destino adequado para as fibras de coco em Moçambique e que, sobretudo, agregue valor no processo de adoção de práticas sustentáveis ao meio ambiente no ramo da engenharia, torna-se cada vez mais imprescindível. Embora reconhecendo os desafios que o país tem de enfrentar para garantir a recolha eficiente dos resíduos de fibras de coco para a sua posterior utilização. Salientar que, também se reconhece aqui a necessidade de quantificar os resíduos de coco produzidos em Moçambique para melhor projeção e implementação de políticas do seu aproveitamento não só para o ramo da engenharia geotécnica através da aplicação das fibras no reforço de solos (que é o foco deste trabalho), bem como para a sua possível aplicação em outros ramos como agricultura, paisagismo, etc.

2.4.3. Proposta para aproveitamento das fibras de coco em Moçambique

Conforme atrás exposto, em moçambique, a maior fração do coco produzido é destinada para fins de culinária, portanto, as partes constituintes do coco mais aproveitadas são a água de coco e a polpa branca espessa. Adicionalmente, uma pequena fração dos resíduos da parte mais externa do coco (exocarpo) é aproveitada pela empresa Conut Organics para fabrico de absorvente de materiais inflamáveis ou tóxicos, utilizado para biorremediação de solos e águas contaminadas. No entanto, as fibras de coco localizadas na região intermediária do coco, logo a seguir à camada mais externa, não são devidamente aproveitada e são descartadas de forma inadequada nos contentores de lixo que depois são transportados e despejados nas lixeiras (local a céu aberto onde são depositados os resíduos independentemente do tipo), que assim constituem o destino final para a maioria das fibras de coco disponíveis em Moçambique. Deste modo, torna-se necessário propor um mecanismo de aproveitamento das fibras de coco em Moçambique de modo a maximizar a cadeia de valor do coco e promover a sustentabilidade ambiental. A Figura 14

representa uma proposta de cadeia de comercialização do coco e destino final das fibras que fazem parte da sua composição.

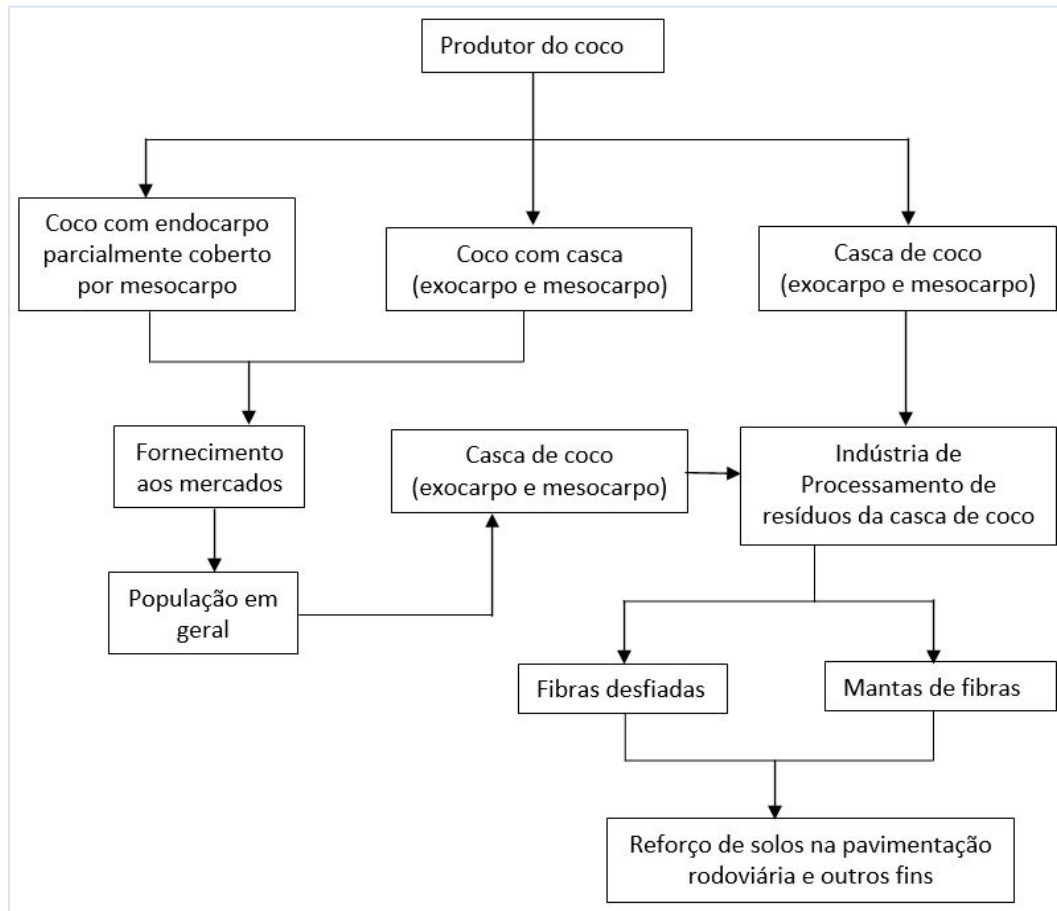


Figura 14. Proposta para aproveitamento sustentável dos resíduos da casca de coco.

A cadeia apresentada na Figura 14 sugere que o destino dos resíduos de coco seja uma indústria de processamento dos mesmos, de modo a garantir a sua utilização de forma sustentável, contribuindo para a maximização da cadeia de valor do coco e para a preservação do meio ambiente. Como se pode observar na Figura 14, o produtor tem três opções de comercialização do coco onde, na primeira opção (prática comum em Moçambique) sugere-se que o coco seja comercializado aos revendedores dos mercados com o endocarpo (camada rígida que cobre a polpa) parcialmente coberto por mesocarpo (fibras). Na segunda opção, que o coco seja comercializado aos revendedores dos mercados com todas as camadas que compõem a casca. A terceira opção, sugere que, se o produtor optar pela primeira opção, a casca composta pela camada mais externa do coco (exocarpo) e pela camada intermediária constituída por fibras (mesocarpo), seja fornecida à indústria especializada para o seu processamento e reutilização para diferentes fins, nomeadamente para fins de reforço de solos em obras de engenharia geotécnica. Importa

salientar que a terceira opção também serve para a população no geral, que quando compra o coco com casca, geralmente faz uso da polpa para fins de culinária e descarta a casca de forma inadequada, contribuindo para a poluição do meio ambiente.

Para a implementação desta proposta, será necessário, primeiro, a montagem das indústrias de processamento em locais estratégicos para garantir que não haja escassez dos resíduos para o seu processamento e, segundo, e não menos importante, deverá existir uma colaboração entre os produtores e os representantes das indústrias de processamento dos resíduos de coco. Por isso, propõem-se a implantação de indústria de processamento das fibras de coco nas províncias da Zambézia (na região centro de Moçambique) e Inhambane (região Sul do país). Considerando prováveis custos elevados para o processo de implantação das indústrias, numa primeira fase poder-se-ia implantar apenas na província da Zambézia por esta ser a maior produtora e fornecedora de coco no país.

Esta medida proposta, além de contribuir para o rendimento as famílias envolvidas no cultivo do coco e também nos benefícios económicos que provavelmente a indústria de processamento irá ter, é evidente que irá promover um espírito de educação ambiental. Assim, todos esses aspetos juntos, concorrem para o conceito e benefícios de um dos objetivos contemporâneos em todo o mundo relativos à economia circular.

(página propositadamente em branco)

CAPÍTULO III.
Reforço de solos com fibras de coco

(página propositadamente em branco)

3. Reforço de solos com fibras de coco

3.1. Introdução

O solo é elemento comum das obras geotécnicas e há limitações das propriedades do mesmo enquanto material de construção, em particular o seu comportamento mecânico e a sua suscetibilidade na presença da água, bem como a grande variação e estratificação entre regiões, sendo muitas vezes requerida a estabilização, e conseqüentemente, o melhoramento do substrato utilizado (N. A. B. de S. e Silva et al., 2019). As propriedades do solo sofrem influências de fatores como clima, mineralogia, relevo e tempo. Além disso, o solo apresenta baixa resistência à tração quando comparados a resistência deste material à compressão. O uso desse material em obras geotécnicas, sobretudo em obras de terra, como por exemplo, em camadas de bases de pavimentos rodoviários, deve satisfazer parâmetros de resistência e deformabilidade adequados (Nicholson, 2014; Souza Júnior et al., 2021).

A necessidade de realização de obras sobre solos de baixa capacidade de suporte, ou seja, solos cujas principais características são a elevada compressibilidade, baixa resistência e reduzida permeabilidade. Sem haver sua substituição, requer estudos geológicos-geotécnicos, bem como análise de critérios económicos, para avaliar qual a melhor alternativa técnica a ser adotada. Em geral, para contornar a limitação de resistência ao corte e viabilizar o uso desses solos, são aplicadas técnicas de consolidação, melhoramento e reforço no intuito de gerar uma minimização ou redistribuição global das tensões e deformações (Souza Júnior et al., 2021). Outrossim, segundo Huang & Han (2009), a remoção e substituição de depósitos de solos naturais problemáticos por solos de elevada resistência ao corte durante o processo construtivo, implicam impactos económicos e ambientais devido à necessidade de transporte e de área para armazenamento do material. Portanto, uma solução tecnicamente eficiente e sustentável para garantir uma elevada resistência ao corte consiste no melhoramento dos solos locais. Entende-se por melhoramento de solos o conjunto de técnicas de reforço e estabilização empregadas para aprimorar propriedades geotécnicas do solo.

De acordo com Gomes et al. (2021), a valorização da geotecnia nas várias fases de planejamento, projeto, construção e operação das infraestruturas de transporte pode contribuir significativamente para a sustentabilidade geral das obras. No âmbito das terraplenagens e das estruturas viárias os grandes desafios da geotecnia envolvem a aplicação de ideias inovadoras,

sobretudo da ciência dos materiais relacionadas com estratégias, materiais e tecnologias aos diferentes níveis do projeto, construção, operação e manutenção.

As infraestruturas geotécnicas trazem inúmeros benefícios para a comunidade. Porém, elas geram grande impacto no ambiente natural quando implementadas sem observância de alguns critérios e/ou cuidados. Posto isto, a utilização de materiais alternativos em diversas obras geotécnicas tornou-se um tema de grande interesse para estudo e aplicação, quer para estabilização e melhoramento, quer para reforço das diversas estruturas geotécnicas (N. A. B. de S. e Silva et al., 2019). Segundo (Natário, 2017), sendo um facto irrefutável que cada projeto tem as suas particularidades e diversos desafios que se apresentam com maior ou menor complexidade de resolução, as soluções a adotar terão de variar de acordo com as singularidades de cada projeto. Assim, as técnicas de melhoramento ou reforço de solos, a empregar em cada caso, deverão ser dependentes, entre outros fatores, dos objetivos do tratamento, isto é, das propriedades do solo que se pretende melhorar. Deste modo, no processo de tratamento dos solos de fundação pode-se pretender atingir três objetivos (Natário, 2017):

- (i) o aumento da capacidade resistente do solo para que determinada estrutura possa ser fundada;
- (ii) o controle dos assentamentos, imediatos ou diferidos no tempo, induzidos por essa mesma estrutura. Usualmente, a complexidade envolvida na prossecução deste segundo objetivo, nomeadamente quando se pretende solucionar e controlar os assentamentos diferenciais, é maior do que a envolvida na garantia da capacidade resistente;
- (iii) a diminuição do risco da ocorrência do fenómeno da liquefação na presença de ações sísmicas, que ao ocorrer pode induzir assentamentos muito elevados ou, mesmo, levar ao colapso das estruturas fundadas, sobretudo em areias submersas.

Segundo J. A. Silva et al. (2020), um dos problemas que pode ocorrer durante a execução de uma obra de engenharia é a variação do volume do terreno, sobretudo em solos expansivos. Na época de estiagem, este solo apresenta altas resistências, sendo difícil a sua remoção. Em períodos mais chuvosos ou em ocasiões que gerem uma elevação da sua humidade, pode-se alcançar valores de expansão elevados. CABRAL et al. (2018), afirmam que, uma forma de solucionar problemas relacionados com o comportamento mecânico dos solos face a presença de água, é a aplicação de medidas de melhoramento, de modo a garantir a sua estabilização.

De acordo com Bell (1988) citado por Correia et al. (n.d.), no âmbito das técnicas de modificação das características dos materiais é habitual utilizar-se os seguintes termos:

- Tratamento: termo geral para designar um procedimento destinado a modificar um material para que esse possa desempenhar as funções às quais se destina;
- Melhoramento: operação que consiste em melhorar, mesmo que temporariamente, as características geotécnicas de um material, principalmente para poder ser utilizado ou aplicado com os equipamentos tradicionais de terraplenagens;
- Estabilização: operação que consiste em aumentar significativamente (geralmente a médio e longo prazo) as características mecânicas de um solo, de modo a induzi-lo num estado definitivo de estabilidade, sobretudo em relação à ação da água e do gelo.

Segundo Casagrande (2005), reforço ou melhoramento de solos consiste na utilização de processos físicos e/ou químicos que visam melhorar as propriedades mecânicas dos solos. Procura-se o aumento da resistência do solo tratado e a diminuição não só da sua compressibilidade, mas também a sua permeabilidade. O termo melhoramento de solos está associado ao tratamento através de processos químicos, enquanto que o termo reforço está associado à inserção de alguns materiais. Por exemplo, a inclusão de geossintéticos, geralmente em aterros ou taludes, de modo a desenvolver parâmetros como resistência ao cisalhamento, compressibilidade, densidade, condutividade hidráulica, entre outros, para fins de engenharia (Ates, 2016; N. A. B. de S. e Silva et al., 2019). A estabilização do solo compreende todos os processos naturais e artificiais que objetivam melhorar características como resistência, durabilidade, entre outras, bem como garantir a manutenção destas melhorias no tempo de vida útil das obras de engenharia. O processo de estabilização implica na modificação das propriedades solo-água, obtendo-se propriedades duradouras compatíveis com uma aplicação particular, sobretudo a resistência mecânica e a resistência à ação da água (Pinto, 2008).

Em obras rodoviárias, frequentemente, são utilizadas misturas estabilizadas de materiais granulares, solos ou ainda misturas de ambos, nas camadas de base, sub-base e eventualmente em reforços de subleito, de modo a garantir maior resistência às cargas, desgaste ou erosão. Seja por meio da compactação, ajuste granulométrico e plasticidade ou seja pela adição de produtos que conferem coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos seus grãos (Vargas, 1977; Barreto, 2019; Costa et al., 2019).

3.2. Características dos solos aplicados em obras rodoviárias

As características físicas e mecânicas dos solos utilizados em camadas de pavimentos são determinantes para seu desempenho a médio e longo prazo. No entanto, na execução de infraestruturas rodoviárias é comum atravessar áreas onde os solos apresentam características geológicas-geotécnicas pouco adequadas para utilização em camadas de pavimentos rodoviários, sobretudo nas camadas de base e sub-base. Nestes casos, torna-se necessário percorrer longas distâncias para obter materiais de qualidade requerida, facto que, geralmente, implica no aumento significativo dos custos das obras. É neste contexto que, R. R. C. da Silva et al. (2020), afirmam que um dos maiores desafios na execução de projetos de obras de infraestruturas rodoviárias, está relacionado com a existência (nos locais a intervencionar) de maciços caracterizados por propriedades geotécnicas inadequadas (por exemplo depósitos quaternários marinhos e aluvionares), ou seja, terrenos com baixa resistência e alta deformabilidade, exigindo da engenharia geotécnica, a aplicação de técnicas de melhoramento e estabilização que minimizem os problemas de assentamentos e de estabilidade que são típicos neste tipo de solos.

3.2.1. Granulometria dos solos

De acordo com DER/SP (2012), é difícil encontrar solos constituídos de uma só fração (argila, silte, areia ou seixo). Por isso, é necessário a realização de análise granulométrica para conhecer as proporções em que as diferentes frações estão presentes num determinado solo. A análise granulométrica consiste em separar os grãos do solo nos seus vários tamanhos e determinar suas proporções. No caso de areias e seixos, a separação é feita pelo processo de peneiração, enquanto que, para as partículas finas, com diâmetro abaixo de 0,075 mm, recorre-se ao processo de sedimentação, onde os grãos maiores são depositados mais rapidamente que os finos.

Segundo Pastana (2006), para a determinação da curva granulométrica, normalmente utiliza-se a fórmula de Fuller-Talbot:

$$P(\%) = 100 \times \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad \text{Fórmula (1)}$$

Onde: P – representa a percentagem, em peso, que passa no peneiro de diâmetro d ;

d – é o diâmetro do peneiro em questão;

D – é o diâmetro máximo das partículas;

n – é o coeficiente que varia entre 0,2 e 0,5 mas geralmente utiliza-se o 0,5.

De modo a garantir facilidade de mistura e consistência no posterior processo de compactação, é necessário determinar a faixa granulométrica necessária. Para tal, recomenda-se o seguinte Pastana (2006):

- limites para o diâmetro máximo: 24,5 mm a 50,8 mm;
- tolerância de + 10% a +40% em torno da curva granulométrica, sendo as maiores tolerâncias para os diâmetros maiores e as menores para os menores;
- deve-se ter: $\frac{(\% \text{ que passa na } \#200)}{(\% \text{ que passa na } \#40)} < \frac{2}{3}$ para evitar o acúmulo de finos na mistura.

3.2.2. Limites físicos ou de Atterberg

Segundo o DER/SP (2012), a consistência dos solos varia principalmente em função da quantidade de argila nele contida e do seu teor de água (humidade) e, é caracterizada pelo comportamento do solo: líquido, plástico, semissólido e sólido. Todavia, o que determina o comportamento do solo são os seus limites físicos, também conhecidos por limites de Atterberg, nomeadamente: Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Retração (LR). Pastana (2006), afirma que os ensaios de Atterberg permitem saber a quantidade de água que o solo absorve para que ele se comporte como um material plástico ou líquido, dando também, indicação do tipo de finos que possui.

O Limite de Liquidez (LL) é o teor mínimo de humidade para o qual o solo perde o comportamento plástico, isto é, muda de estado, passando do plástico para o líquido. Os siltes apresentam valores mais baixos que as argilas. Portanto, o solo comporta-se como um líquido, ou como uma lama muito mole, se estiver com um teor de humidade superior ao Limite de Liquidez. Este limite é determinado em laboratório utilizando a concha de Casagrande, constituída por uma manivela que move um recipiente metálico. O Limite de Liquidez (LL) é teor de humidade para o qual a ranhura padronizada (geralmente com 1 cm) feita no solo se fecha com 25 golpes.

O Limite de Plasticidade (LP) é o teor mínimo de humidade para o qual é possível moldar cilindros de solo com 0,3 cm de diâmetro e 12 a 15 cm de comprimento. Corresponde à humidade a partir da qual o solo passa do estado sólido para o plástico.

O índice de Plasticidade (IP) corresponde à extensão do intervalo de humidades no qual o solo apresenta um comportamento plástico e dá-se pela diferença entre os limites LL e LP.

$$IP = LL - LP$$

Fórmula (2)

Para aplicação em obras rodoviária, são recomendados os seguintes limites (Pastana, 2006):

- Limite de Liquidez: $LL \leq 25\%$.
- Índice de Plasticidade: $IP \leq 6\%$.

O mesmo autor realça que, no caso de misturas de frações distintas, pode-se calcular os novos índices ponderando os componentes da mistura, através das equações seguintes:

$$LL_m = \frac{\sum(\%A_i \times LL_i \times \%#40)}{\sum(\%A_i \times \%#40)} \quad \text{Fórmula (3)}$$

$$IP_m = \frac{\sum(\%A_i \times IP_i \times \%#40)}{\sum(\%A_i \times \%#40)} \quad \text{Fórmula (4)}$$

Onde: LL_m - Limite de Liquidez da mistura;

$\%A_i$ - percentagem do componente que entra na mistura;

LL_i - Limite de Liquidez do componente;

$\%#40$ - percentagem contida no componente que passa no peneiro #40;

IP_m - Índice de Plasticidade da mistura;

IP_i - Índice de Plasticidade do componente.

O Limite de Retração (LR) corresponde, como o próprio nome sugere, ao teor de humidade abaixo do qual cessa a redução de volume do solo ao perder humidade.

De acordo com o DER/SP (2012), dentre as classificações geotécnicas que se baseiam nos limites de Atterberg (LL e LP) e na granulometria, para aplicação no meio rodoviário, destaca-se a tradicional classificação HRB (Highway Research Board). Nesta classificação, os solos são agrupados e classificados por tipo, de A1 a A7, considerando o seu comportamento como camada para composição da estrutura do pavimento, cujo primeiro grupo (A-1a, A-1b, A-2-4, A-2-5 e A3) são os solos (granulares) considerados de excelentes a bons, e o segundo grupo (A-4, A-5, A-6, A-7-5 e A-7-6) considerado de regulares a maus.

Quadro 4. Classificação geotécnica HRB (Highway Research Board) dos solos.

Classes dos Solos	Categorias dos Solos	Granulometria			Limites de Atterberg	
		Material que passa na #10 (2,0 mm)	Material que passa na #40 (0,42 mm)	Material que passa na #200 (0,075 mm)	Limite de Liquidez (LL)	Índice de Plasticidade (IP)
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)

Solos Excelentes a bons (% que passa na #200 < 35)	A-1	A-1a	< 50	< 30	< 15	-	< 6
		A-1b	< 50	< 50	< 25		< 6
	A-3		< 50	> 50	< 10		NP
	A-2	A-2-4			< 35	≤ 40	≤ 10
		A-2-5				> 40	≤ 10
		A-2-6				≤ 40	> 10
		A-2-7				> 40	> 10
Solos Regulares a Maus (% que passa na #200 > 35)	A-4		-	-	> 35	≤ 40	≤ 10
	A-5					> 40	≤ 10
	A-6					≤ 40	> 10
	A-7-5					> 40	> 10
	A-7-6					> 40	> 10

(Fonte: DER/SP, 2012)

Convém realçar que, para ensaios de índices de consistência (Limites de Atterberg) utiliza-se o material que passa no peneiro #40 (0,42 mm).

3.2.3. Compactação

Independentemente de se recorrer ou não a outras soluções de melhoramento de solos para fins rodoviários, a operação de compactação tem lugar sempre na realização desse tipo de obras. Assume particular importância na etapa de terraplanagem superficial, antes da execução da camada de desgaste. De acordo com DER/SP (2012), a compactação é o método de estabilização de solos mais económico e que permite obter o estado de estabilidade do solo de forma rápida e relativamente fácil. Contudo, a eficiência da compactação depende diretamente da humidade do solo e da energia de compactação aplicada, sendo que, para cada solo haverá uma determinada humidade (humidade ótima) com a qual se obterá a máxima densidade. Usualmente, para a determinação da humidade ótima no laboratório, utiliza-se o ensaio de Proctor que, no procedimento convencional consiste em:

- preparação de algumas amostras de solo com diferentes humidades, compactando-as nas mesmas condições e com a mesma energia, dentro de um cilindro padronizado;
- a densidade (ou então a massa específica aparente) do solo seco, isto é, descontada a humidade em cada uma das amostras após a compactação, é determinada e representada num gráfico, em ordenadas, e as correspondentes humidades em abcissas;
- ligam-se os pontos do gráfico obtendo-se a chamada curva *Densidade - Humidade*, que permite inferir qual a humidade que possibilitaria obter, para aquela energia de

compactação, a máxima densidade sendo os valores correspondentes são chamados respectivamente de umidade ótima (H_{ot}) e densidade máxima ($D_{máx}$).

Segundo DER/SP (2012), a densidade de qualquer amostra de solo pode ser expressa em percentagem (grau de compactação) que represente a densidade máxima. Por isso, é comum nas normas de serviço especificar-se, por exemplo, que o solo nos aterros deverá apresentar um grau de compactação correspondente, no mínimo, a 95% da densidade máxima, obtida segundo um determinado ensaio. A densidade máxima varia com os vários tipos de solo, sendo que, os maiores são obtidos com solos arenosos e que vão decrescendo para os solos finos (siltes-e argilas). A variação da umidade tem uma grande influencia nas características de um solo, independentemente do mesmo estar ou não estabilizado. Ou seja, variando a umidade, haverá também variação da estabilidade e do volume do solo em causa. Assim, um solo na sua densidade máxima oferece maior estabilidade e maior resistência à variação de umidade, seja quanto ao aumento por absorção ou pela perda por evaporação.

3.2.4. Resistência ou CBR

O ensaio de resistência do solo ou CBR (California Bearing Ratio) é um ensaio de penetração que permite avaliar a capacidade de carga do solo, para apurar se é ou não adequado à fundação de uma determinada estrutura projetada. Segundo Marques (2018), a capacidade de carga dos materiais constituintes do subleito e das outras camadas dos pavimentos é feita pelo CBR, em corpos de prova indeformados ou moldados em laboratório, para as condições de massa específica aparente e umidade especificada para o serviço. De acordo com Pastana (2006), o ensaio CBR, consiste basicamente em:

- i. penetração, em velocidade constante ($0,05 \text{ pol}/\text{min}$ ou $0,127 \text{ cm}/\text{min}$), de um pistão metálico de diâmetro padronizado cuja área é conhecida (3 pol^2 ou $19,35 \text{ cm}^2$), numa amostra de solo compactada, dentro de um cilindro metálico de 6 polegadas de diâmetro e 7 polegadas de altura;
- ii. compactação da amostra no cilindro, nas condições de umidade e densidade do projeto e imersão em água com 4 dias antes do ensaio de penetração, simulando a pior condição a que o pavimento estará sujeito;
- iii. durante o período de imersão medir-se-á a expansão do corpo de prova;
- iv. após a imersão, procede-se à penetração e o resultado do ensaio é obtido comparando-se as forças necessárias para se efetuar a penetração de 0,1 e 0,2 pol da amostra, com uma brita graduada padronizada.

As diferentes camadas, incluindo o subleito do pavimento, devem ser compactadas de acordo com os valores fixados nas Normas, mas recomenda-se que em nenhum caso, o grau de compactação seja inferior a 100% (Marques, 2018). Os valores de CBR e Expansão das misturas para uso em camadas de obras rodoviárias deverão obedecer os seguintes critérios (Pastana, 2006; Marques, 2018):

- Para subleito: $\left\{ \begin{array}{l} C. B. R. \geq 2\% \\ Expansão \leq 2\% \text{ (medida no ensaio C. B. R)} \end{array} \right.$
- Para reforço do subleito: $\left\{ \begin{array}{l} C. B. R. > \text{ o do subleito} \\ Expansão \leq 1\% \text{ (medida com sobrecarga de 10 lbs)} \end{array} \right.$
- Para sub-base: $\left\{ \begin{array}{l} C. B. R. \geq 20\% \\ IG = 0 \\ Expansão \leq 1\% \text{ (medida com sobrecarga de 10 lbs)} . \end{array} \right.$
- Para base: $\left\{ \begin{array}{l} C. B. R. \geq 80\% \\ Expansão \leq 0,5\% \text{ (medida com sobrecarga de 10 lbs)} \\ Limite de liquidez \leq 25\% \\ Índice de plasticidade \leq 6\% \end{array} \right.$

3.3. Reforço e estabilização de solos com fibras

A estabilização de solos com recurso ao uso de fibras (reforço de solos com fibras) é uma das técnicas mais antigas que já vem sendo utilizada pela humanidade desde há muito tempo.

O reforço de solos com recurso a fibras faz parte das técnicas de melhoramento e estabilização física. A estabilização física do solo, pode ser classificada como parte da estabilização mecânica, onde as propriedades do solo são alteradas modificando-se sua textura, através do emprego de um ou mais materiais, de modo a se enquadrarem dentro de uma determinada especificação, como, por exemplo, a correção granulométrica ou a adição de fibras (metálicas, minerais, sintéticas ou vegetais), resultando dessa combinação de materiais, um terceiro produto que agrega as propriedades de suas fases constituintes, o qual dá-se o nome de material compósito (Pinto, 2008; Alencar et al., 2019). Assim, a estabilização física comumente empregada em obras de terra é a técnica da modificação das propriedades do solo, principalmente na textura do mesmo, através da mistura de solos de diferentes frações granulométricas.

Um solo reforçado com fibras padrão é definido como uma massa de solo que contém elementos discretos distribuídos aleatoriamente, ou seja, fibras, que proporcionam uma melhoria no comportamento mecânico do material compósito denominado fibrossolo (Ates, 2016). Diversos estudos comprovaram que a incorporação de fibras no solo faz com que o mesmo tenha um comportamento melhorado quando comparado ao solo natural. Ou seja, causa o aumento do atrito

e coesão do solo, aumenta a sua resistência à tração e, conseqüentemente, aumenta a capacidade de carga e reduz a sua compressibilidade mediante a dissipação dos esforços empregados ao solo (Neto et al., 2016).

Para a definição do tipo e da quantidade de fibra a utilizar na estabilização de um solo, é fundamental a compreensão do mecanismo de interação matriz-reforço e da parcela de contribuição de cada uma das componentes (matriz e reforço) no comportamento do material compósito como um todo (Quariguasi et al., 2018). O solo reforçado com fibras tem comportamento de um material compósito resultante da incorporação de fibras de resistência à tração relativamente alta numa matriz de solo, permitindo que as tensões de corte no solo mobilizem a resistência à tração nas fibras, que por sua vez, conferem maior resistência ao solo (Neto et al., 2016).

Segundo McGown et al. (1978), citados por Ates (2016) e Neto et al. (2016), na solução de estabilização com fibras (inclusões idealmente extensíveis) fazem parte as fibras de módulo de deformabilidade relativamente baixo. A qual, por um lado, compreende as fibras naturais e que são incluídas de forma aleatória e direta na matriz do solo, por exemplo raízes de plantas e, por outro lado, compreende os materiais fibrosos incorporados de forma controlada no solo, ou seja, materiais pertencentes à família dos geossintéticos. Solução que, no contexto atual, tem ganhado mais destaque, não só pelas suas vantagens no mecanismo de reforço (incorporação controlada), como também, por permitir a otimização das propriedades da fibra, tais como, comprimento, diâmetro, textura da superfície, etc., em função da finalidade da estabilização.

Para que se consiga os maiores ganhos possíveis nos desempenhos mecânicos do solo reforçado com fibra, é importante que a dosagem de fibra a aplicar seja quantificada de forma correta (Neto et al. 2016). Porém, apesar dos esforços empreendidos atualmente em relação à estabilização de solos com fibras, os mesmos autores ressaltam que ainda não existe uma dosagem predefinida para a sua aplicação nos solos, pelo que, é necessário o estudo diferenciado em relação à quantidade e comprimento para cada tipo de aplicação e do solo a ser utilizado. Assim, a definição do tipo e quantidade de fibra dependerá, principalmente, das características da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante (Gonçalves et al., 2017; Quariguasi et al., 2018).

Sintetizam-se de seguida algumas conclusões de um estudo realizado por Gonçalves et al. (2017) no Brasil, sobre uma amostra de solo colhida em Itaitinga, na região metropolitana de Fortaleza, estado do Ceará, com predominância de torrões e seixo, classificado como A-2-4 na classificação rodoviária HRB ou AASHTO. O objetivo do estudo era avaliar as potencialidades das fibras de

propileno e do cimento no melhoramento do CBR do solo. Para isso foi utilizado o cimento Portland do tipo CP V ARI RS (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial) na proporção de 2% da massa seca da amostra de solo combinada com 1% e 2% de fibras de polipropileno do tipo Fibromac-24, com 24 mm de comprimento, 18 μm de diâmetro e área de superfície específica de 244 m^2/kg .

De um modo geral, com base nos valores de CBR obtidos e apresentados, verificou-se que o compósito apresentou um incremento de até 116,2% na sua resistência ao incorporar o CP V ARI RS e a fibra de polipropileno, alcançando níveis adequados para aplicação em pavimentos de tráfego intenso. O solo, ao ser fortalecido com a fibra, demonstrou aumento no CBR em todas as percentagens analisadas. Por outro lado, a expansão volumétrica revelou valores favoráveis com a utilização de até 1,5% de fibra e valores desfavoráveis com a adição de 2,0% de fibra. Na sequência dos resultados obtidos, Gonçalves et al., (2017) concluíram que o fibrossolo pode ser empregado tanto para reduzir a expansibilidade do solo quanto para incrementar a sua capacidade de suporte. Assim, concluíram que o solo reforçado com cimento e fibra apresenta índices de CBR considerados favoráveis para aplicação em base de pavimentos rodoviários de tráfego intenso, atingindo neste caso, um valor de 147,2% com 2% de cimento e 1% de fibra. No entanto, os resultados da expansão do solo não demonstraram as reduções pré-estabelecidas pelas especificações vigentes, mantendo esses valores praticamente inalterados após a execução das misturas.

Outro estudo realizado em Lisboa por F. Martins et al. (2022), ou seja, um grupo de três professores e investigadores, sendo dois da Universidade Lusófona de Humanidade e Tecnologias e um da Universidade de Lisboa, cujo objetivo era avaliar o desempenho mecânico do cimento Portland CEM II/B-L 42,5R e fibras de cânhamo na estabilização e reforço de uma areia argilosa com elevada plasticidade, forneceram os resultados apresentados no Quadro 5.

Nos critérios de aceitação estabelecidos pelas Infraestruturas de Portugal, estão definidos os valores mínimos aceitáveis para a resistência à tração aos 7 e 28 dias de cura, sendo que aos 7 dias a resistência deve ser igual ou superior a 0,20 MPa e aos 28 dias de cura a resistência deve ser igual ou superior a 0,30 MPa (Martins et al., n.d.) valores que, conforme resultados do Quadro 5, foram alcançados.

Quadro 5. Um exemplo de resultados do estudo realizado por (F. Martins et al., 2022)

Designação	Solo de Fundação	Solo Modificado	Solo Modificado + 3% Cimento	Solo Modificado + 3% Cimento + 0,1% Fibras
Classificação Rodoviária (AASHTO)	A-7-6	A-6	-	-
Limite de Liquidez LL (%)	46.5	34.4	-	-
Limite de Plasticidade LP (%)	19.9	18.2	-	-
Índice de Plasticidade IP (%)	26.6	19.3	-	-
Equivalente de Areia EA (%)	0.0	13.9	-	-
Proctor - Peso Volúmico Aparente Seco Máximo $\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	1.850	2.110	2.025	1.97
Proctor - Teor de humidade ótimo W (%)	16.0	8.5	10.0	11.2
CBR imediato para cravação de 2.5 mm (%)	-	-	88	152
CBR imediato para cravação de 5.0 mm (%)	-	-	109	152
CBR para cravação de 2.5 mm após 4 dias de embebição (%)	-	16	323	274
CBR para cravação de 5.0 mm após 4 dias de embebição (%)	-	20	328	258
Resistência à Compressão Simples 1 dia (MPa)	-	-	0.5	2.55
Resistência à Compressão Simples 7 dias (MPa)	-	-	2.55	2.9
Resistência à Compressão Simples 28 dias (MPa)	-	-	2.55	4.0
Resistência à Tração Indireta 1 dia (MPa)	-	-	0.17	0.29
Resistência à Tração Indireta 7 dias (MPa)	-	-	0.23	0.38
Resistência à Tração Indireta 28 dias (MPa)	-	-	0.31	0.53

Outros estudos têm sido desenvolvidos com vista a melhor conhecer o mecanismo de reforço de solos com fibras bem como dos fatores que o influenciam conforme apresento nas secções seguintes.

3.3.1. Influência das fibras no comportamento do solo

3.3.1.1. Influência das fibras na compactação

Diferentes estudos realizados com fibras cujo objetivo era avaliar a influência da adição de diferentes percentagens de fibras (0.5%, 1% e 2%) na compactação de um solo argiloso apuraram uma redução da densidade em 4% e um ligeiro aumento da humidade ótima correspondente a 11%, para o teor de 2% de fibras relativamente ao peso do solo seco (Feuerharmel, 2000). O mesmo autor, refere que em outros estudos realizados por diferentes investigadores, envolvendo as mesmas percentagens de fibras, mas com solo arenoso, obteve-se o mesmo comportamento verificado para os solos argilosos com relação à humidade ótima e densidade. Entretanto, num

outro estudo referido por Feuerharmel (2000), no qual foram testadas as mesmas percentagens de fibras, neste caso de fibras de propileno, a um cascalho com areia, verificou-se um aumento da resistência à compactação e, conseqüentemente, um aumento da porosidade da mistura, para energia de compactação constante. Constatou ainda que o aumento era linear em relação a quantidade de fibras, independentemente do tipo de compactação.

3.3.1.2. Influência das fibras na resistência de pico

Em estudos laboratoriais desenvolvidos com um material argiloso, onde foram realizados ensaios de compressão não confinada em materiais resultantes da mistura de argila com fibras, foi observado um aumento dos valores de pico de resistência à compressão e à tração, bem como da ductilidade da mistura. Esta relação, também era afetada com a humidade do solo no momento da compactação, apresentando resultados mais expressivos para menores humidades (Feuerharmel, 2000). Além disso, Moher e Ho (1994) citados por Feuerharmel (2000), constataram que o aumento da quantidade de fibras no solo argiloso resulta no aumento da resistência à compressão e à tração, mas o aumento do comprimento das fibras provoca diminuição do efeito das fibras na compressão e tração do material. Nataraj et al. (1996) e diferentes outros autores citados por Feuerharmel (2000), através de ensaios de corte direto e ensaios triaxiais, constataram que as fibras promovem aumento no ângulo de atrito, sendo que, o mesmo aumenta com o aumento da quantidade de fibras na matriz do solo, porém, em solos com quantidade de argila acima de 15% , as fibras promovem diminuição do ângulo de atrito. Relativamente à coesão, em quase todos estudos já realizados e publicados, foi comprovado que as fibras promovem um aumento da coesão, tanto em solos granulares, como em solos argilosos. Contudo, no caso da areia siltosa, os estudos revelaram que neste material, as fibras têm uma grande influência apenas no aumento da coesão, verificando-se uma alteração insignificante no ângulo de atrito (Feuerharmel, 2000).

3.3.1.3. Influência das fibras na resistência de pós-pico

Relativamente a este aspeto, segundo Feuerharmel (2000), em todas pesquisas desenvolvidas, com objetivo de estudar o efeito das fibras na resistência pós-pico, constatou-se que a inclusão de fibras no solo contribuiu para a redução da queda de resistência, ou seja, as fibras promovem melhorias na capacidade de resistência pós-pico do material.

3.3.1.4. Influência das fibras na deformabilidade

Diversos autores constataram aumento do modo de deformabilidade, tanto em solos argilosos, como em solos arenosos, sendo esse aumento mais expressivo quanto maior for a quantidade de fibras (Feuerharmel, 2000). Além disso, também foi constatado, através de estudos de laboratório realizados por vários autores, que a inclusão de fibras no solo promove o aumento da ductilidade que aumenta, de forma expressiva, quanto maior for a quantidade de fibras.

Contrariamente às constatações referidas no parágrafo anterior, Ulbrich (1997) e Consolo et al. (1999), ambos citados por Feuerharmel (2000), obtiveram nos seus estudos resultados que indicavam redução do módulo de deformabilidade com aumento do teor de fibras no solo. Entretanto, em outro estudo referido por Feuerharmel (2000), os autores observaram aumento da rigidez sob condições drenadas e redução da rigidez para quantidades elevadas de fibras (da ordem de 40%).

Em solos arenosos cimentados, através de ensaios de compressão não confinada, foi observado que, dependendo da quantidade de cimento adicionado ao solo, a inclusão de fibras pode provocar tanto aumento, assim como diminuição, do módulo de deformabilidade e da resistência do material.

3.3.1.5. Influência das fibras na variação volumétrica

A inclusão de fibras como reforço de solos arenosos provoca aumento das deformações volumétricas, verificando-se maiores deformações quanto maior for a quantidade de fibras, mas o aumento acontece de forma não linear. Além disso, verifica-se um aumento da compressibilidade do solo com a inclusão de fibras ao mesmo, bem como aumento da deformação volumétrica de compressão na rotura (Feuerharmel, 2000).

3.3.1.6. Influência das fibras na condutividade hidráulica

Vários estudos foram desenvolvidos para avaliar a influência da adição de fibras na condutividade hidráulica do solo. Em solos argilosos, indicaram que a inclusão de fibras nesses materiais promove (Feuerharmel, 2000):

aumento da condutividade hidráulica;

aumento na permeabilidade, traduzindo-se num maior aumento quanto maior for a quantidade de fibras, tendo sido observado um acréscimo da ordem de 10 vezes para um teor de 4% de fibras de propileno e vidro;

diminuição de retração de painéis de solo argiloso moldados a partir de uma pasta de solo com humidade correspondente ao limite de liquidez, e também o surgimento de fissuras cada vez mais visíveis com aumento do teor de fibras e comprimento das fibras.

No caso de solos arenosos confirmaram uma redução da permeabilidade numa ordem de grandeza.

3.3.1.7. Influência das fibras no modo de rotura

Com vista a estudar o padrão de rotura de um solo arenoso reforçado com malhas de propileno, Morel e Gourc (1997) citados por Feuerharmel (2000), conduziram ensaios de carga biaxial no qual os resultados indicaram não haver nenhuma variação da posição da zona de corte com a inclusão das fibras. Contudo, verificaram uma modificação no comportamento do material, ou seja, devido à sua ductilidade, mesmo após a formação da zona de cisalhamento, as fibras fizeram com que as tensões continuassem a aumentar, pois parte da carga passou a ser absorvida por elas. Outro aspeto constatado tem haver com as variações do desenvolvimento da zona de corte. Após atingir um certo nível de deformação, elas passaram a ser menos ativas com o aumento das deformações e, cada vez que essas deformações iam progredindo, começaram a formar-se zonas de corte secundárias, resultando em zonas mais largas e situadas nas proximidades da zona de corte inicial.

No caso de solos argilosos, alguns autores constataram uma transição na natureza da rotura, passando de uma rotura frágil para uma rotura dúctil. Foi igualmente constatada uma relação entre o comprimento das fibras e a espessura da zona de corte que pode ter afetado a resistência da amostra testada (Feuerharmel, 2000).

3.4. Reforço de solos com fibras de coco

Conforme já exposto as fibras de coco pertencem à família das fibras duras e apresentam boas propriedades de durabilidade e resistência. No Quadro 6 estão apresentadas propriedades mecânicas das fibras de coco, segundo pesquisas de diferentes autores.

Quadro 6. Propriedades mecânicas das fibras de coco resultantes de diferentes estudos.

Módulo de Young (GPa)	Resistência à tração	Deformação na rotura (%)	Referência
-----------------------	----------------------	--------------------------	------------

	(Mpa)		
3.50	174	25	Toledo Filhos (1997)
2.80	95 - 118	23.9 - 51.4	Savastano e Agopyan (1998)
3.00	100 - 250	30	Tomczak (2010)

(Fonte: MOTTA, 2018)

3.4.1. Influência da adição de fibras de coco nas propriedades dos solos

Refere-se em primeiro lugar, o estudo foi desenvolvido por (Júnior et al., 2018) no Brasil que teve como objetivo avaliar a influência da adição de fibras de coco na compressibilidade de um solo argiloso. Para tal foram utilizadas amostras deformadas, de solo de textura fina e de alta plasticidade, obtidas na região Metropolitana do Recife, município de Jaboatão dos Guararapes, no Brasil. As fibras (resíduos da casca de coco) utilizadas foram obtidas já beneficiadas por uma comunidade situada no estado do Ceará, por orientação da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). De forma aleatória, foram selecionadas de um fardo, três amostras de fibras de coco com 15g cada, totalizando 45g e, de seguida, foi feita uma caracterização gravimétrica das amostras do material fibroso, preparação dos corpos de prova e execução dos ensaios.

As propriedades dos solos e a caracterização gravimétrica das fibras estão apresentadas nos Quadros 7 e 8, respetivamente.

Quadro 7. Propriedades dos solos usados no estudo.

Designação	Solo
Classificação Rodoviária (AASHTO)	A-7-5
Limite de Liquidez LL (%)	49.34
Limite de Plasticidade LP (%)	31.42
Índice de Plasticidade IP (%)	17.92
Equivalente de Areia EA (%)	0.45
Massa Volúmica (g/cm ³)	2.621

Quadro 8. Composição gravimétrica das fibras utilizadas no estudo.

Classificação das fibras	Peso (%)
Pó	16.26
1 cm < L < 5 cm	80.92
5 cm < L < 10 cm	2.33
L > 10 cm	0.49

O estudo consistiu primeiro na mistura de amostras de solo com fibra e preparação de corpos de prova cilíndricos com área de 78.58 cm² e altura de 12.7 cm. Foram utilizados teores de 0, 0.5, 1 e 2% de fibra de coco em relação ao peso seco de amostra de solo. A moldagem dos corpos de prova foi realizada com a compactação do material na umidade ótima das respectivas misturas, obtidas previamente através de ensaios de compactação realizados seguindo especificações definidas pela ASSHTO, utilizando-se a energia Proctor normal e com reuso do material. Os ensaios forneceram os parâmetros apresentados no Quadro 9.

Quadro 9. Parâmetros de compactação das misturas.

	Teor de Fibras			
	0 %	0.5 %	1 %	2 %
Umidade Ótima (%)	19.2	19.4	19.6	20.5
Densidade Seca (g/cm ³)	1.68	1.66	1.64	1.58

A segunda fase do estudo consistiu na realização de ensaios de compressibilidade utilizando uma célula edométrica, com objetivo de determinar a influência dos diferentes teores de fibras de coco no índice de compressão (Cc), índice de descompressão (Cs) e na tensão de sobreconsolidação (σ'_a). O Cc é determinado pela inclinação do trecho da reta de compressão virgem do material e o Cs é determinado pela inclinação do trecho da reta de descarregamento. O procedimento completo seguido na realização dos ensaios pode ser consultado em (Júnior et al., 2018).

Quadro 10. Parâmetros de compressibilidade e de resistência ao corte do solo puro e das misturas na condição não inundada

Teor de Fibra	Compressibilidade			Parâmetros de resistência	
	Cc	Cs	σ'_a (MPa)	c (MPa)	ϕ (°)
0 %	0.182	0.009	0.280	0.060	30.5
0.5 %	0.196	0.016	0.250	0.076	31.3
1 %	0.228	0.032	0.180	0.081	32.7
2 %	0.241	0.031	0.130	0.071	30.1

Quadro 11. Parâmetros de compressibilidade e de resistência ao corte do solo puro e das misturas na condição inundada

Teor de Fibra	Compressibilidade			Parâmetros de resistência	
	Cc	Cs	σ'_a (MPa)	c (MPa)	ϕ (°)
0 %	0.195	0.029	0.220	0.026	32.7
0.5 %	0.218	0.033	0.180	0.037	32.9
1 %	0.256	0.039	0.150	0.041	34.6
2 %	0.261	0.035	0.120	0.029	32.7

Destaca-se ainda o caso de dois estudos desenvolvidos com o mesmo tipo de material, sendo um realizado por L. D. Gonçalves & Araújo, (2015) e outro por Sotomayor & Casagrande (2015), ambos também realizados no Brasil. Tiveram como objetivo o estudo experimental das potencialidades das fibras de coco como alternativa de reforço de solos para aplicação em obras geotécnicas. Para tal, recorreram a ensaios de carga em placa de grande magnitude.

Para o estudo, foi utilizado um solo arenoso proveniente da região de Santa Cruz, no Rio de Janeiro. O material apresentava uma densidade real dos grãos foi de 2.642 g/cm^3 , índice de vazios mínimo do material de 0.50 e máximo de 0.70, percentagem de finos de 2.2% e sem matéria orgânica. Na Figura 15 é ilustrado o solo natural, seco, utilizado no estudo. Por outro lado, no Quadro 12 estão apresentados os índices físicos do mesmo.



Figura 15. Solo arenoso utilizado no estudo.

Quadro 12. Valores dos índices físicos do solo puro.

Índices Físicos	
Densidade específica dos grãos - Gs	2.642
Coefficiente de não uniformidade - CNU	5.08
Coefficiente de Curvatura - CC	1.01
Diâmetro efetivo - D10	0.214
Diâmetro médio - D50	0.892
Índice de Vazios máximo	0.70
Índice de Vazios mínimo	0.50

As fibras utilizadas para o estudo foram obtidas do coco pela empresa ECOFIBRA, parceira da COMLURB (Companhia Municipal de Limpeza Urbana da Cidade do Rio de Janeiro), através de um processo mecânico de aproveitamento da casca de coco. As fibras recebidas em fardos, foram desfiadas e cortadas segundo comprimentos de 25 mm e 50 mm, previamente estabelecidos,

porém, por serem fibras naturais, tinham diâmetros variáveis. O teor de fibras utilizado nos ensaios foi de 0.5% do peso do solo seco e a sua inclusão na matriz do solo foi feita de forma aleatória. A Figura 16 ilustra as etapas pelas quais as fibras passaram antes de serem adicionadas ao solo, enquanto o Quadro 13 representa a síntese das propriedades do solo puro e das misturas, resultantes de ensaios de laboratório.



Figura 16. Fibras de coco utilizadas no estudo (A – fibras em fardo; B – fibras desfiadas; C – fibras cortadas com 25 mm de comprimento; D – fibras cortadas com 50 mm de comprimento)

(L. D. Gonçalves & Araújo, 2015).

Quadro 13. Principais características do solo puro e das misturas

Material	Características físicas				Parâmetros de resistência	
	Areia pura (%)	Fibra de Coco (%)	Gs	Peso Específico (g/cm ³)	c (MPa)	ϕ (°)
Solo Arenoso	100	0	2.70	2.69	0	32.54
A05C25	99.5	0.5	2.61	2.65	0.052	40.81
A05C50	99.5	0.5	2.58	2.65	0.043	40.56

3.4.2. Avaliação do efeito da adição de fibras de coco nas estruturas

Tendo por base as conclusões dos estudos mencionados procede-se no Capítulo seguinte a uma avaliação paramétrica dos efeitos do reforço de solos em obras rodoviárias suportada em modelações numéricas por recurso ao programa de cálculo automático RS2 da Rocscience.

(página propositadamente em branco)

CAPÍTULO IV.

Avaliação numérica do reforço de solos com fibras

(página propositadamente em branco)

4. Modelação do comportamento de solos melhorados com fibras de coco

Para avaliação do efeito do melhoramento dos solos mediante a utilização de fibras de coco em obras viárias (fundação de pavimentos e dos aterros) recorrer-se-á ao software comercial RS2 desenvolvido pela empresa Rocscience (www.rocscience.com).

4.1. Programa RS2

O programa de cálculo RS2 é um programa de cálculo automático desenvolvido para modelar e analisar o comportamento de solos e rochas quando submetidos a carregamentos ou escavações. Este programa é de grande importância na engenharia, sobretudo nas engenharias geotécnica, civil e mineira, pois permite projetar e analisar modelos 2D ou 3D de estabilidade de taludes de solos ou rochas, prever assentamentos ao longo do tempo no processo de consolidação de um aterro, analisar deformações dos solos sobrecarregados, estimar deformações em escavações e prever falhas. Deste modo, o uso deste software, permite aumentar a eficiência operacional e reduzir custos através de realização de análises de modelos do comportamento de um determinado material sob determinadas condições previamente estabelecidas.

O software considera as variáveis que compõem o tensor de tensão do material em estudo incluindo as tensões mobilizadas por uma eventual sobrecarga aplicada ao material. Tais variáveis são o sigma 1 (σ_1), sigma 3 (σ_3) e sigma Z (σ_Z), onde o sigma 1 representa a maior tensão principal num ponto dentro do material (neste caso solo) e atua na direção em que a tensão é máxima e permite avaliar a resistência do material a solicitações de cargas externas. O sigma 3 representa a menor tensão principal num ponto dentro do material, atuando na direção em que a tensão é menor. Por fim, o sigma Z representa a tensão vertical (normal) que atua perpendicularmente à superfície do material. A tensão vertical (sigma Z) é causada pela gravidade, sendo positiva quando aponta para baixo e negativa quando aponta para cima. O conhecimento dessas variáveis é imprescindível em estudos que envolvam a análise de estabilidade de estruturas, pois a compreensão dessas tensões (σ_1 , σ_3 e σ_Z) conduz a um projeto e uma construção mais eficaz, nos diversos ambientes geotécnicos, garantindo ainda a segurança das mesmas.

4.2. Procedimento de análise seguido

Na Figura 17 é apresentado o fluxograma de procedimentos de análise seguido na avaliação numérica do efeito do reforço de obras de terra rodoviárias com fibras de coco.

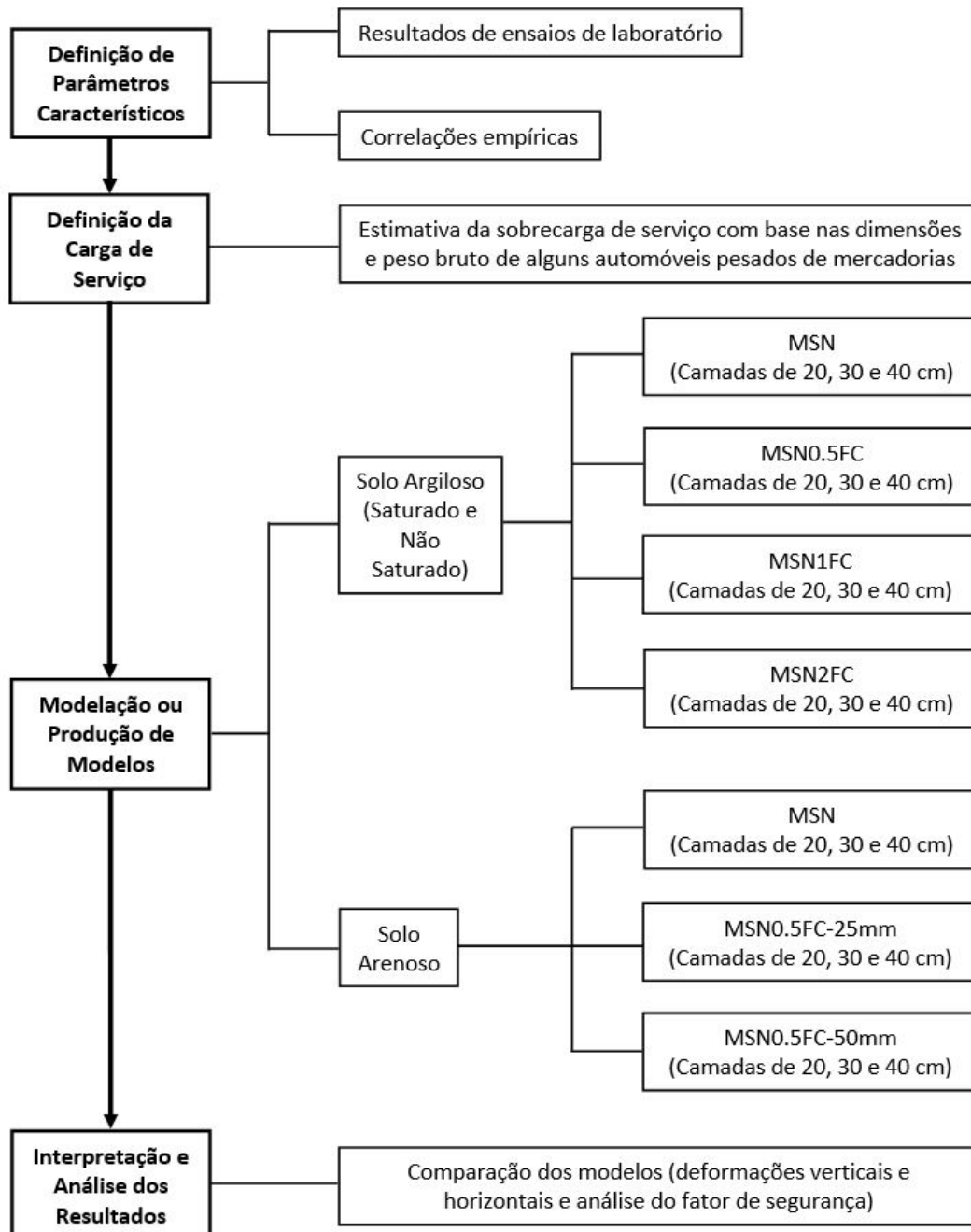


Figura 17. Procedimentos de análise do comportamento dos solos melhorados com fibras de coco.

A designação MSN significa Modelo de Solo Natural, enquanto as designações MSN0.5FC, MSN1FC, MSN1.5FC e MSN2FC significam Modelos de Solo Natural melhorado com 0.5%, 1%, 1.5% e 2% de fibras de coco, respetivamente. Por outro lado, as designações MSN0.5FC-25mm e MSN0.5FC-50mm significam Modelos de Solo Natural melhorados com 0.5% de fibras de coco com 25 e 50 mm de comprimentos, respetivamente.

Complementarmente refere-se que a globalidade das análises foram desenvolvidas para dois tipos de estruturas geotécnicas. A primeira corresponde à estrutura de um pavimento rodoviário, com uma camada de solos reforçados com 30cm, e a segunda ao caso de um pequeno aterro homogéneo com cerca de 3m de altura de solos reforçados com fibras de coco.

4.3. Modelação numérica

4.3.1. Definição dos parâmetros característicos

A análise da estabilidade de um maciço terroso natural ou compactado, bem como a de um compósito (por exemplo fibrossolo) com recurso a modelações numéricas no software RS2, carece de um prévio conhecimento de algumas características dos materiais, tais como: o seu peso específico, as suas propriedades elásticas (módulo de elasticidade e coeficiente de poisson) e propriedades de resistência (resistência à tração, ângulo de atrito e coesão).

Neste estudo, a modelação foi feita com base nas características de dois materiais distintos representativos de materiais ocorrentes na área de Moçambique. Assim, foram desenvolvidas análises sobre um solo argiloso e sobre um arenoso. Usou-se ainda na modelação os resultados dos ensaios de laboratório mencionados no Capítulo anterior.

O primeiro grupo analisado diz respeito à modelação do comportamento de um solo argiloso de alta plasticidade melhorado com fibras de coco com comprimentos variáveis entre o que é considerado pó até ao comprimento de 10 cm, sendo que, a maior percentagem de fibras tem comprimentos variáveis entre 1 cm e 5 cm. A classificação do solo e os pesos das fibras no compósito podem ser consultados no Capítulo III, Quadros 7 e 8. Adicionalmente, foram modeladas duas condições distintas: condição não inundada e condição inundada. Em ambas situações, os valores da coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e peso específico (γ) são resultados dos estudos de laboratório apresentados no Capítulo III. Faz-se notar, que foram admitidos os valores do coeficiente de poisson (ν) e do módulo de elasticidade (E) dos solos naturais constantes no Quadro 14 (condições do material não saturado) e no Quadro 15 (condições do material saturado),

fundamentados em correlações empíricas conhecidas. Optou-se, conservativamente, por esta via pelo facto de não terem sido executados ensaios de deformabilidade sobre os compósitos.

Em ambas as situações (Quadros 14 e 15), a modelação foi iniciada para o caso do solo argiloso natural e de seguida para as misturas. Ou seja, solos argilosos naturais melhorados (compósitos) com 0.5% de fibras de coco (SN0.5FC), 1% de fibras de coco (SN1FC), 1.5% de fibras de coco (SN1.5FC) e 2% de fibras de coco (SN2FC), respetivamente.

Quadro 14. Parâmetros característicos do solo argiloso não saturado e das misturas solo-fibras.

Material			Parâmetros				
Solo Natural ou Mistura	Solo Natural (%)	Fibras (%)	c (MPa)	ϕ (°)	γ (MN/m ³)	E (MPa)	ν
SN	100	0.0	0.060	30.5	0.017	10	0.30
SN0.5FC	99.5	0.5	0.076	31.3	0.016	10	0.30
SN1FC	99	1.0	0.081	32.7	0.016	10	0.30
SN1.5FC	98.5	1.5	0.076	31.4	0.016	10	0.30
SN2FC	98	2.0	0.071	30.1	0.015	10	0.30

Quadro 15. Parâmetros característicos do solo argiloso saturado e das misturas solo-fibras.

Material			Parâmetros				
Solo Natural ou Mistura	Solo Natural (%)	Fibras (%)	c (MPa)	ϕ (°)	γ (MN/m ³)	E (MPa)	ν
SN	100	0.0	0.026	32.7	0.017	6	0.40
SN0.5FC	99.5	0.5	0.037	32.9	0.016	6	0.40
SN1FC	99	1.0	0.041	34.6	0.016	6	0.40
SN1.5FC	98.5	1.5	0.035	33.6	0.016	6	0.40
SN2FC	98	2.0	0.029	32.7	0.015	6	0.40

No segundo caso foi modelado o solo arenoso considerando os parâmetros correspondentes apresentado no Capítulo III. Para composição das misturas (solo-fibras), foram utilizados dois comprimentos das fibras de coco (25mm e 50mm) e uma percentagem de 0.5% de fibras de coco correspondente ao peso do solo seco. Assim, foram produzidos dois compósitos que são designados por SN0.5FC-25mm correspondente à mistura de solo arenoso natural com 0.5% de fibras de coco com 25 mm de comprimento e SN0.5FC-50mm correspondente à mistura de solo arenoso natural com 0.5% de fibras de coco com 50 mm de comprimento. Além do peso específico (γ), os valores dos parâmetros de resistência, isto é, a coesão (c) e o ângulo de atrito (ϕ) também foram obtidos conforme os resultados apresentados no Capítulo III. Contudo, admitiu-se os valores do módulo de elasticidade (E) e do coeficiente de poisson (ν) apresentados no Quadro 16,

fundamentados em correlações conhecidas e constantes de acordo com o justificativo apresentado para o caso dos solos argilosos.

Quadro 16. Parâmetros característicos do solo arenoso e das misturas solo-fibras.

Material			Parâmetros				
Solo Natural ou Mistura	Solo Natural (%)	Fibras (%)	c (MPa)	ϕ (°)	γ (MN/m ³)	E (MPa)	ν
SN	100	0.0	0.00	32.54	0.026	70	0.25
SN0.5FC-25mm	99.5	0.5	0.052	40.81	0.025	70	0.25
SN0.5FC-50mm	99.5	0.5	0.043	40.56	0.025	70	0.25

Em ambos os casos, admite-se um valor nulo para a resistência à tração (σ_t), uma vez que, não foram feitos ensaios para a determinação desse parâmetro e, de um modo geral, os solos resistem adequadamente às tensões de compressão (σ_c), porém apresentam baixa resistência ao corte (τ) e uma resistência à tração praticamente nula.

4.3.2. Definição da carga de serviço

Para a simulação do comportamento em serviço dos solos reforçados com fibras de coco em obras rodoviárias os modelos foram sujeitos a uma sobrecarga correspondente às tensões que a infraestrutura estará submetida durante o tempo de vida útil. Deste modo, com base nas características (comprimento, largura e peso bruto) dos veículos mais frequentes nas vias moçambicanas, que correspondem sobretudo a veículos pesados de transporte de mercadorias, foi possível através da Fórmula 5, estimar as tensões que os mesmos exercem sobre o pavimento sendo os correspondentes valores apresentados no Quadro 17.

$$Tensão = (Peso\ Bruto)/Área \quad \text{Fórmula (5)}$$

Quadro 17. Características de alguns veículos pesados de transporte de mercadorias e passageiros e a tensão máxima que exercem sobre o pavimento.

Tipo de Veículos a motor	Peso Bruto	Comprimento Máximo	Largura Máxima	Área (m ²)	Tensão	
	60 ton	25.25 m	2.55 m	64.386	0.932 ton/m ²	0.009 MN/m ²
Veículo de 2 eixos com semirreboque de 3 eixos	44 ton	16.5 m	2.55 m	42.075	1.046 ton/m ²	0.010 MN/m ²
Conjunto de Veículo trator semirreboque	40 ton	16.5 m	2.55 m	42.075	0.951 ton/m ²	0.009 MN/m ²
Automóveis pesados de passageiros articulados	32 ton	18.75 m	2.55 m	47.813	0.669 ton/m ²	0.007 MN/m ²
Veículos com 2 ou mais eixos	32 ton	12 m	2.55 m	30.600	1.046 ton/m ²	0.010 MN/m ²

Assim, assumindo que acima da camada da base do pavimento será incluída a camada de revestimento e que a mesma possui rigidez suficiente, tal que, numa situação real as suas

deformações são desprezíveis, é razoável admitir uma tensão de 0.020 MN/m^2 para a modelação, tendo em conta o valor máximo (0.010 MN/m^2) da tensão transmitida pelo veículos (Quadro 17) e um incremento de 0.010 MN/m^2 referente à camada de revestimento e eventuais situações não previstas. Para avaliar os assentamentos, e eventuais situações de rotura por corte para as condições de serviço.

4.3.3. Modelações numéricas

4.3.3.1. Modelos do comportamento do solo argiloso não saturado

Para permitir a análise comparativa, e apurar as possíveis potencialidades das fibras de coco no reforço de solos aplicados em obras rodoviárias, numa primeira fase foi analisado o comportamento dos casos de solos argilosos em condições não saturadas. Os modelos usados são compostos por uma camada homogénea de solos com 1.5 metros de espessura e sujeitos a uma sobrecarga de 0.020 MN/m^2 . No estudo paramétrico consideram-se diferentes condições de melhoramento da camada superior do solo, com cerca de 30cm de espessura correspondente à base do pavimento, mediante a incorporação de 0.5%, 1%, 1.5% e 2% de fibras de coco. Foram desenvolvidos cinco modelos, sendo que, um foi modelado com apenas o solo natural (SN) em toda espessura de 1.5 metros da camada, e quatro com 1.20 metros de solo natural e 0.30 metros de camada superficial melhorada com 0.5%, 1%, 1.5% e 2%, respetivamente.

Para a produção dos modelos referidos no parágrafo anterior, foram utilizados os parâmetros de entrada (Input) apresentados no Quadro 14, referentes ao solo argiloso em estudo, nas condições não saturadas. Um exemplo ilustrativo de um dos modelos gerados está apresentado na Figura 18 e os outros podem ser vistos no Anexo 1.

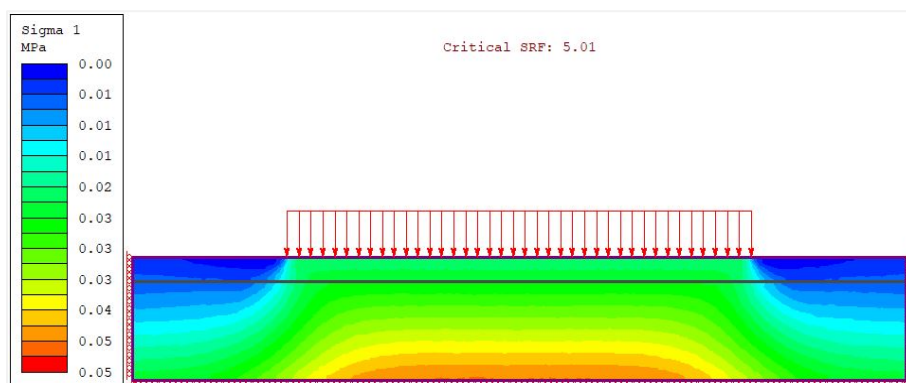


Figura 18. Variação da tensão no solo argiloso não saturado, onde a camada superficial foi reforçada com 1% de fibras de coco.

4.3.3.2. Modelos do comportamento do solo argiloso saturado

Nesta secção, refere-se que o procedimento para o caso de solo saturado é análogo ao exposto para o caso não saturado resultando no mesmo número de modelos (cinco modelos) analisados. Porém, neste caso, utilizaram-se os parâmetros de entrada apresentados no Quadro 15, referentes ao solo argiloso no seu estado saturado. Na Figura 19, é apresentado um exemplo ilustrativo dos modelos produzidos sendo os restantes incluídos no Anexo 2.

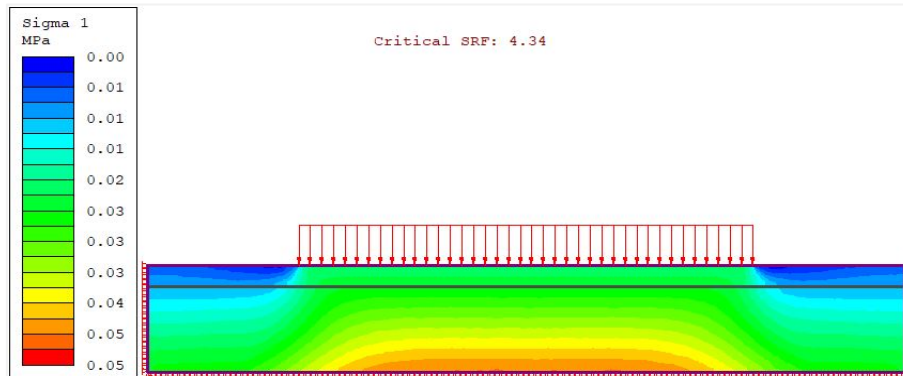


Figura 19. Variação da tensão no solo argiloso saturado, onde a camada superficial foi reforçada com 1% de fibras de coco.

4.3.3.3. Modelos do comportamento do solo arenoso

No caso do solo arenoso, os modelos foram produzidos considerando um solo compactado com um teor de humidade ótimo, conforme referido Capítulo III. Neste caso, foram produzidos dois modelos em que camada superficial de 0.30 m de espessura foi aditivada com o mesmo teor de 0.5% de fibras de coco, porém com diferentes comprimentos. Num modelo consideram-se fibras de 25 mm e no outro fibras de 50 mm de comprimento. Para estes casos, os dados de entrada utilizados correspondem aos apresentados no Quadro 16, correspondentes ao solo arenoso em estudo. Um dos modelos resultantes desta modelação é ilustrado na Figura 20 sendo a sua globalidade incluída no Anexo 3.

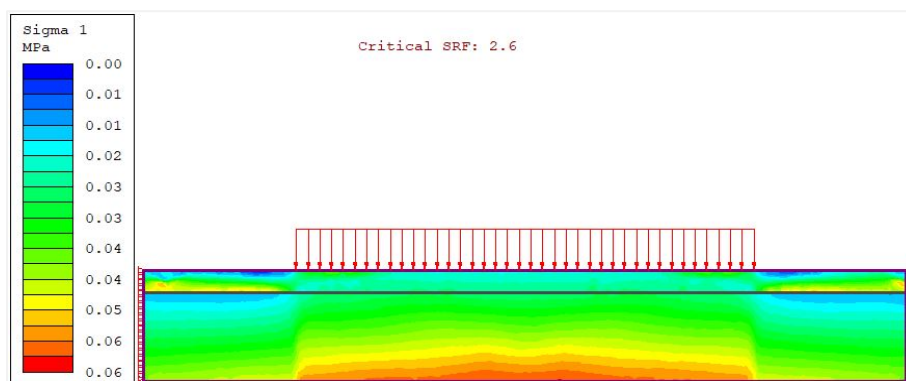


Figura 20. Variação da tensão no solo arenoso, onde a camada superficial foi reforçada com 0.5% de fibras de coco de 25 mm de comprimento.

4.3.4. Modelos do comportamento dos aterros

Para a simulação do comportamento dos aterros, tanto do solo argiloso assim como do solo arenoso, foi considerada modelação de aterros com 3.0 metros de espessura, fundados sobre o mesmo tipo de solo, cuja fronteira indeformável encontra-se 2.0 metros abaixo da base do aterro. Para garantir uma análise comparativa que permita apurar com segurança as potencialidades das fibras de coco no reforço das estruturas em apreço, foram considerados modelos de aterros considerando taludes com diferentes inclinações. Assim, foram produzidos modelos de aterros com taludes de 30, 40 e 45 graus de inclinação, para as diferentes percentagens de fibras dos solos argilosos nas duas condições (saturada e não saturada) estudadas e para a mesma percentagem de fibras (5%) mas diferentes comprimentos de fibras para os casos do solo arenoso analisado. Deste modo, foram produzidos trinta modelos com parâmetros do solo argiloso, sendo quinze com parâmetros do solo argiloso não saturado e quinze com os do solo argiloso saturado.

Adicionalmente, no caso do solo argiloso não saturado, foram desenvolvidos três modelos com parâmetros do solo natural e com taludes de 30, 40 e 45 graus, e doze modelos com parâmetros das misturas (solo-fibra), tendo-se produzido três modelos para cada percentagem (0.5%, 1.0%, 1.5% e 2.0%) utilizada e com taludes de 30, 40 e 45 graus. Os modelos resultantes dessa modelação podem ser vistos parcialmente nas Figuras 21 e 22 e na sua globalidade no Anexo 4.

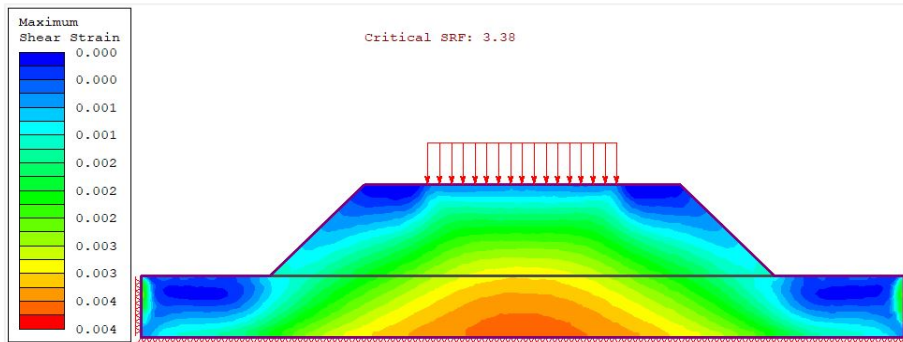


Figura 21. Máxima deformação por corte em modelo de aterro simulado com solo argiloso não saturado e com taludes de 45°.

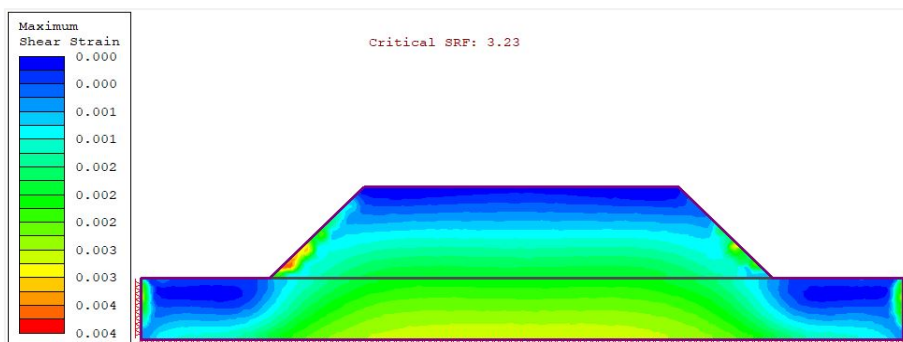


Figura 22. Máxima deformação por cisalhamento em modelo de aterro executado com solo argiloso não saturado, reforçado com 0.5% de fibras de coco e com taludes de 45°.

Na modelação de aterros com solo argiloso saturado, seguiu-se o mesmo procedimento obedecido para modelar aterros com solo argiloso não saturado considerando os materiais resultantes da mistura com as diferentes percentagens de fibras estudadas. Os resultados dessa modelação podem ser vistos no Anexo 5. As Figuras 23 e 24 ilustram exemplos de resultados da modelação para a situação mais desfavorável, ou seja, aterros com taludes a 45° de inclinação com a horizontal.

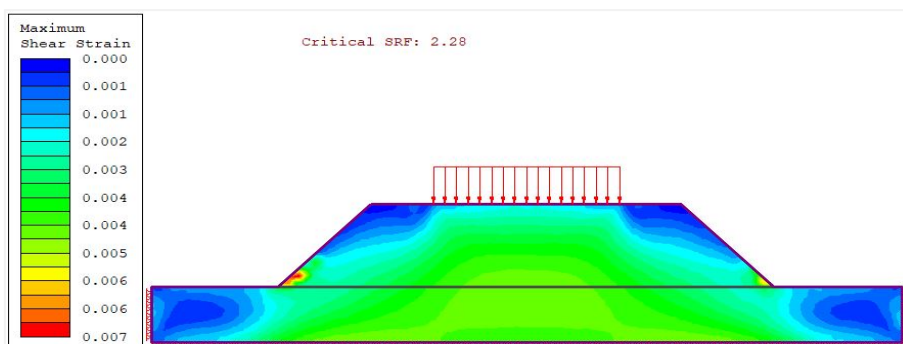


Figura 23. Máxima deformação por corte do modelo de aterro simulado com solo argiloso saturado e taludes de 45°.

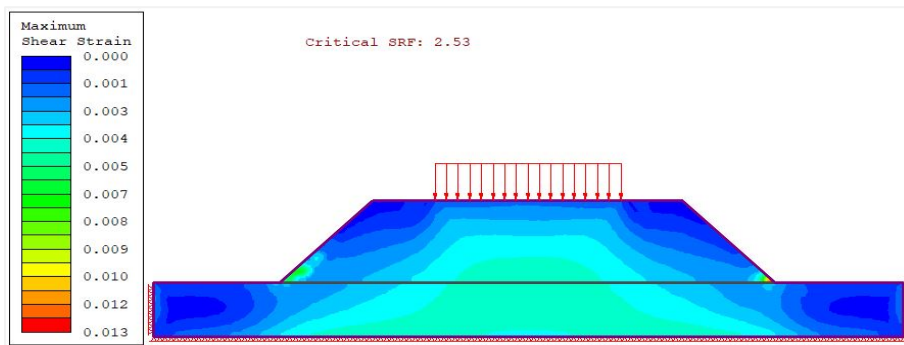


Figura 24. Máxima deformação por corte do modelo de aterro simulado com solo argiloso saturado, reforçado com 0.5% de fibras de coco e com taludes de 45°.

No caso do solo arenoso, foram produzidos nove modelos, dos quais:

- três com solo natural e correspondentes às inclinações dos taludes de 30, 40 e 45 graus, respectivamente;
- três modelos com parâmetros das fibras de 25 mm de comprimentos na proporção de 0.5%;
- três modelos com parâmetros das fibras de 50 mm de comprimento na mesma proporção de 0.5%, obedecendo inclinações de taludes de 30, 40 e 45 graus.

As Figuras 24 e 25 ilustram dois desses resultados incluindo-se no Anexo 6 a globalidade dos modelos produzidos com base nos parâmetros do solo arenoso e das misturas com fibras mencionadas.

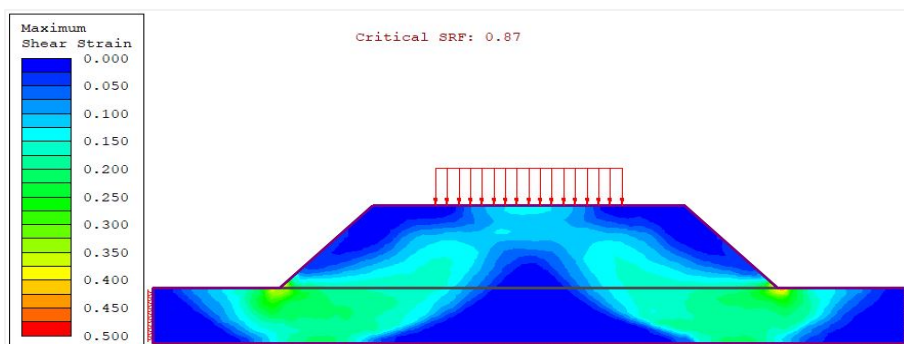


Figura 25. Máxima deformação por corte do modelo de aterro simulado com solo arenoso natural e taludes de 45°.

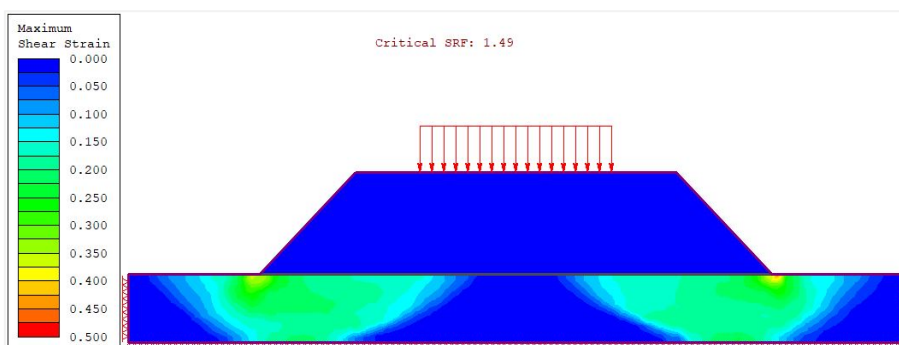


Figura 26. Máxima deformação por corte do modelo de aterro simulado com solo arenoso reforçado com 0.5% de fibras de coco com 25 mm de comprimento, taludes de 45°.

4.4. Análise dos resultados

A análise faz-se através de comparação entre os modelos do comportamento da plataforma e dos aterros executados com solo natural, com os modelos do comportamento dos compósitos formados pela mistura dos solos naturais com diferentes percentagens de fibras e/ou com diferentes comprimentos de fibras de coco.

Além das tensões também são analisadas as deformações dos solos em condições de serviço. Estas deformações correspondem aos deslocamentos do solo na direção vertical (deformação vertical - Δy).

4.4.1. Influência das fibras de coco nos solos da camada da base do pavimento

4.4.1.1. Solo argiloso não saturado

No Quadro 18 estão apresentados os resultados dos assentamentos e dos fatores de redução de corte do solo argiloso natural não saturado e das misturas deste com diferentes teores de fibras de coco.

Quadro 18. Resultados do assentamento e fator de redução de corte dos modelos da plataforma em solo argiloso não saturado.

Material			Resultados	
Solo Natural ou Mistura	Solo Argiloso (%)	Fibras (%)	δ (mm)	SRF Crítico
SN	100	0.0	4	4.99
SN0.5FC	99.5	0.5	3	5.05
SN1FC	99	1.0	3	5.01
SN1.5FC	98.5	1.5	7	2.77
SN2FC	98	2.0	7	2.88

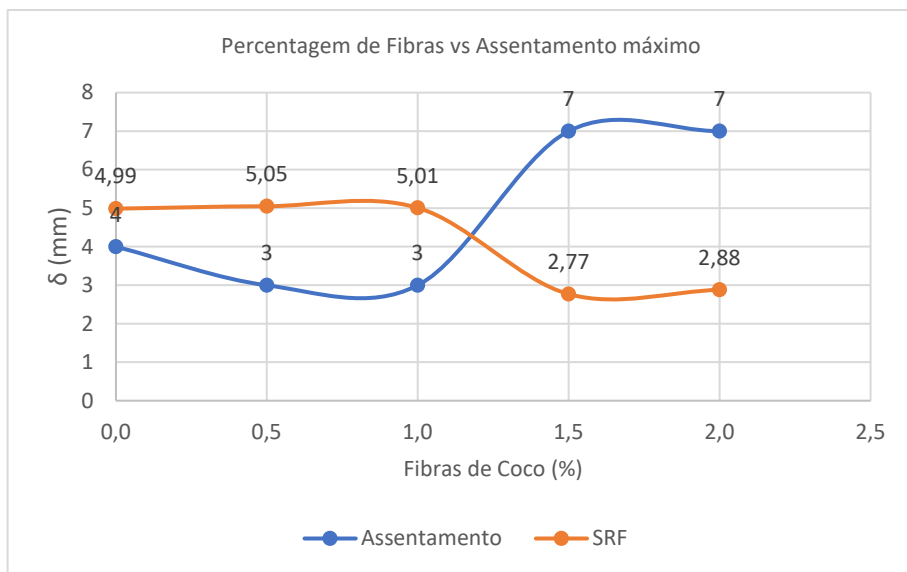


Figura 27. Influência das fibras de coco no assentamento e segurança da plataforma em solo argiloso não saturado.

Como se pode observar na Figura 27, a plataforma executada com solo argiloso natural não saturado, apresenta um assentamento na ordem de 4 mm e um SRF de 4.99. O mesmo solo, nas mesmas condições, porém com a parte superficial da camada correspondente a 0.30 m melhorada com 0.5% de fibras apresenta uma redução 1 mm do valor do assentamento baixando de 4 para 3 mm, e um ligeiro aumento do SRF de 4.99 para 5.05. O mesmo verifica-se quando a camada é melhorada com 1.0% de fibras, onde o assentamento reduz na mesma proporção, ou seja, passa de 4 mm referente ao solo natural para 3 mm no solo natural com parte da camada (0.30 m) melhorada com 1.0% de fibras, e o SRF aumenta de 4.99 para 5.01. No solo melhorado com 1.5% e 2.0% de fibras de coco verifica-se um efeito contrário às duas proporções anteriores, ou seja, em ambas as proporções (1.5 e 2.0%) verifica-se um aumento do valor do assentamento na ordem de 3 mm, passando de 4 mm referentes ao modelo do solo natural para 7 mm nos modelos da plataforma com camada superficial de 0.30 m melhorada com 1.5 e 2.0% de fibras. Verifica-se também uma redução do SRF de 4.99 do solo natural para 2.77 e 2.88 dos solos melhorados com 1.5% e 2.0%, respectivamente.

4.4.1.2. Solo argiloso saturado

No Quadro 19 estão apresentados os resultados dos assentamentos e dos fatores de redução de corte (SRF) do solo argiloso natural saturado e das misturas com diferentes teores de fibras de coco.

Quadro 19. Resultados do assentamento e fator de redução de corte dos modelos da plataforma em solo argiloso saturado.

Material			Resultados	
Solo Natural ou Mistura	Solo Argiloso (%)	Fibras (%)	δ (mm)	SRF Crítico
SN	100	0.0	5	4.33
SN0.5FC	99.5	0.5	4	2.76
SN1FC	99	1.0	4	4.34
SN1.5FC	98.5	1.5	4	4.34
SN2FC	98	2.0	4	4.09

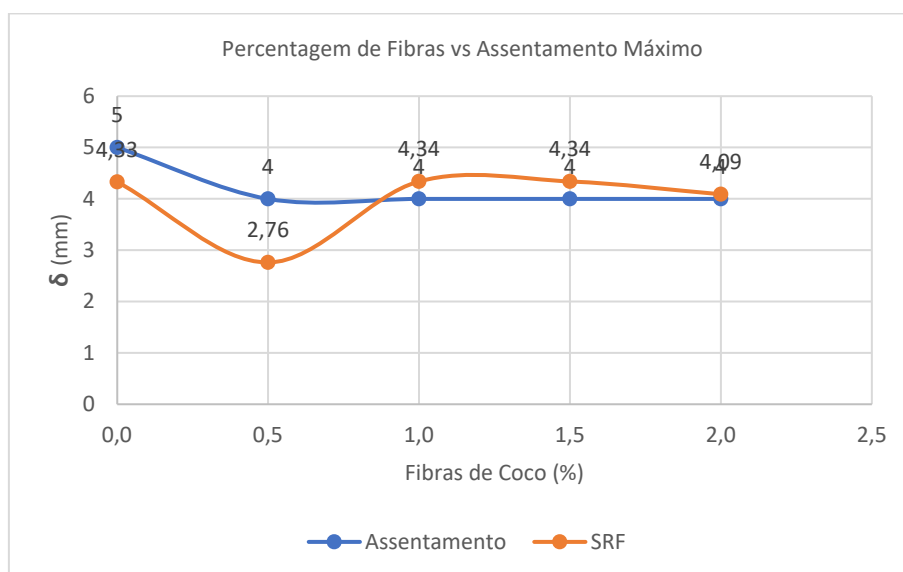


Figura 28. Influência das fibras de coco no assentamento e segurança da plataforma em solo argiloso saturado.

A Figura 28 é referente à representação gráfica dos resultados do modelo da plataforma executada com espessura de 1.5 m em solo argiloso natural saturado e os quatro modelos com a camada superior com 0.30 m de espessura melhorada com diferentes teores fibras. Na Figura percebe-se que o assentamento da plataforma executada com solo natural é da ordem de 5 mm e o SRF igual a 4.33. Nos modelos das plataformas melhoradas com 0.5%, 1.0%, 1.5% e 2% de fibras de coco verifica-se uma redução da ordem de 1 mm no valor do assentamento, baixando de 5 para 4 mm, e uma redução do valor do SRF nos teores de 0.5% e 2.0% que baixou de 4.33 para 2.76 e 4.09, respectivamente. Nos teores de 1.0% e 1.5% verifica-se um aumento residual do SRF, ou seja, em ambos os casos o SRF passou de 4.33 para 4.34.

4.4.1.3. Solo arenoso

O Quadro 20 ilustra os resultados dos assentamentos e dos fatores de redução de corte (SRF) dos modelos executados com solo arenoso natural e de dois modelos executados com a camada

superficial de 0.30 m melhorada com o mesmo teor de 0.5% de fibras de coco correspondente ao peso total do material, porém com dois comprimentos diferentes já referidos nas secções anteriores, ou seja, um modelo executado com fibras de 25 mm de comprimento e outro com fibras de 50 mm.

Quadro 20. Resultados do assentamento e fator de redução de segurança dos modelos da plataforma em solo arenoso.

Material			Resultados	
Solo Natural ou Mistura	Solo Arenoso (%)	Fibras (%)	δ (mm)	SRF Crítico
SN	100	0.0	1	2.12
SN0.5FC-25mm	99.5	0.5	1	2.60
SN0.5FC-50mm	99.5	0.5	1	2.62

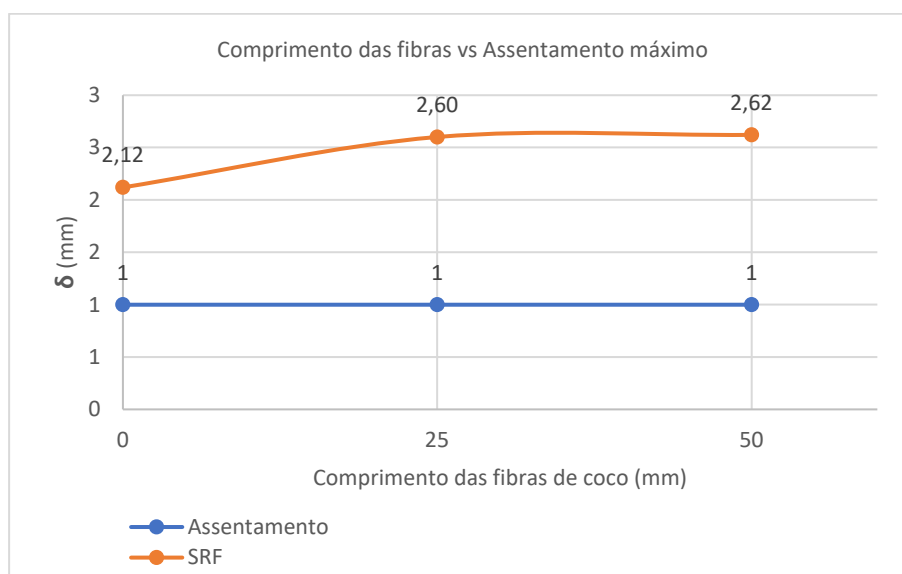


Figura 29. Influência das fibras de coco no assentamento e segurança da plataforma em solo arenoso.

A Figura 29 representa os resultados dos assentamentos e SRF's dos modelos gerados com parâmetros do solo arenoso natural e com mistura do solo arenoso com 0.5% de fibras com os dois comprimentos considerados. Nela nota-se que o assentamento da plataforma executada com solo natural é de 1 mm e o mesmo não apresentou variação com aplicação das fibras de coco, quer de 25 mm assim como as de 50 mm. Porém, verifica-se um aumento do valor do SRF que passou de 2.12 do modelo do solo natural para 2.60 e 2.62 nos modelos executados com parâmetros das fibras de 25 e 50 mm, respetivamente.

4.4.2. Influência das fibras de coco em aterros

No caso dos modelos dos aterros, a representação gráfica dos resultados, que se apresenta seguidamente, é diferente da dos modelos das plataformas. Enquanto nos modelos das plataformas os gráficos dos assentamentos e dos SRF são representados na mesma Figura para o mesmo tipo de solo, aqui optou-se por representá-los em Figuras separadas, por forma a obter-se uma melhor visualização da influência dos reforços no comportamento das estruturas.

4.4.2.1. Aterros em solo argiloso não saturado

No Quadro 21 encontram-se apresentados os resultados dos assentamentos e dos fatores de redução de corte nos modelos dos aterros executados com diferentes inclinações dos taludes (30, 40 e 45°), utilizando os parâmetros do solo argiloso natural não saturado e das misturas do solo com diferentes teores de fibras de coco. No Quadro 22, está apresentada uma síntese dos parâmetros dos materiais e dos resultados das modelações.

Quadro 21. Resultados do assentamento e fator de corte dos modelos dos aterros em solo argiloso não saturado e diferentes misturas.

Taludes dos Aterros	Modelos	Material			Resultados	
		Solo Natural ou Mistura	Solo Argiloso (%)	Fibras (%)	δ (mm)	SRF Crítico
Solo Argiloso Não Saturado, Taludes com 30°	Aterro 1	SN	100	0.0	24	3.43
	Aterro 1.1	SN0.5FC	99.5	0.5	20	3.50
	Aterro 1.2	SN1FC	99	1.0	20	3.50
	Aterro 1.3	SN1.5FC	98.5	1.5	20	3.50
	Aterro 1.4	SN2FC	98	2.0	20	3.58
Solo Argiloso Não Saturado, Taludes com 40°	Aterro 2	SN	100	0.0	24	3.39
	Aterro 2.1	SN0.5FC	99.5	0.5	16	3.41
	Aterro 2.2	SN1FC	99	1.0	20	3.47
	Aterro 2.3	SN1.5FC	98.5	1.5	20	3.47
	Aterro 2.4	SN2FC	98	2.0	20	3.55
Solo Argiloso Não Saturado, Taludes com 45°	Aterro 3	SN	100	0.0	24	3.38
	Aterro 3.1	SN0.5FC	99.5	0.5	13	3.23
	Aterro3.2	SN1FC	99	1.0	20	3.23
	Aterro 3.3	SN1.5FC	98.5	1.5	20	3.23
	Aterro 3.4	SN2FC	98	2.0	20	3.48

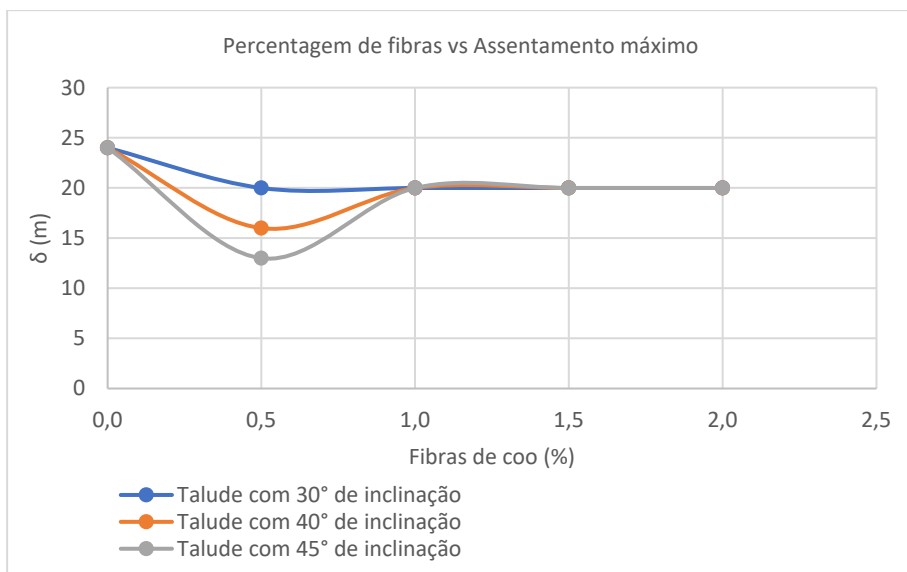


Figura 30. Influência das fibras de coco no assentamento dos aterros em solo argiloso não saturado.

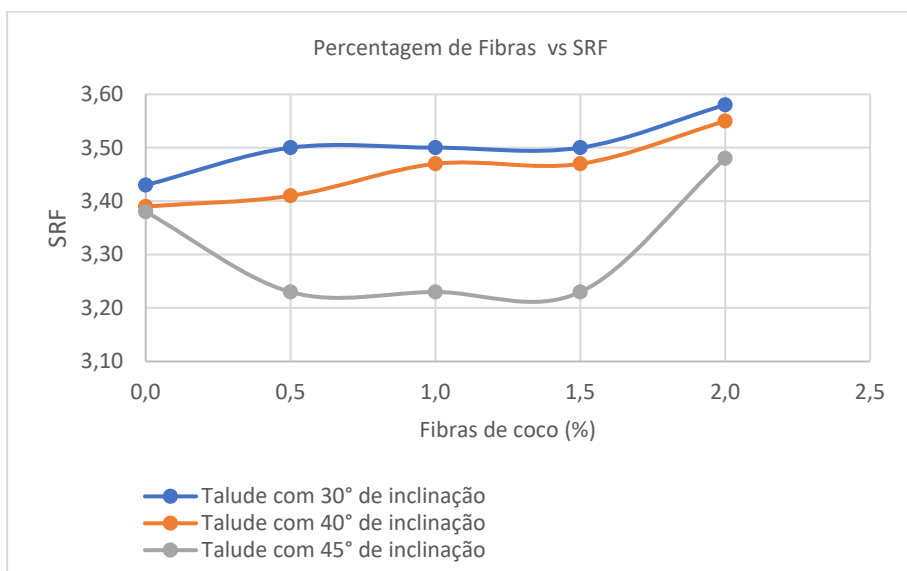


Figura 31. Influência das fibras de coco na estabilidade dos aterros em solo argiloso não saturado.

Conforme ilustrado na Figura 30, os modelos dos aterros executados com parâmetros do solo argiloso natural não saturado apresentaram o mesmo valor de assentamento, igual a 24 mm, para todas inclinações de taludes (30, 40 e 45°) simuladas. Verificou-se ainda uma ligeira redução da segurança com aumento do ângulo de inclinação dos taludes. No modelo executado com taludes com 30° de inclinação o valor do SRF foi de 3.43, enquanto nos modelos executados com taludes a 40 e 45° os SRF's (Figura 31) foram de 3.39 e 3.38, respectivamente. No entanto, com aplicação dos diferentes teores de fibras de coco, verificou-se uma redução do assentamento e um aumento da segurança em todos modelos elaborados com diferentes inclinações para os taludes laterais. Nos modelos de aterros executados com taludes a 30°, o assentamento reduziu de 24 mm

(correspondente aos aterros executados com solo natural) para 20 mm nos aterros executados com solos melhorados com 0.5%, 1%, 1.5% e 2.0% de fibras, ou seja, o assentamento manteve-se constante (20 mm) para todos teores simulados, porém, o SRF passou de 3.43 do solo natural para 3.50 no solo melhorado com os teores de 0.5%, 1.0% e 1.5% de fibras de coco e, no solo melhorado com 2.0% o SRF aumentou de 3.43 para 3.58.

Nos modelos executados com taludes com 40° de inclinação, o assentamento reduziu de 24 mm, correspondente ao solo natural, para 16 mm no modelo executado com solo melhorado com 0.5% de fibras de coco e, o SRF aumentou de 3.39 para 3.41. Os modelos dos aterros executados com solo melhorado com 1.0%, 1.5% e 2.0% de fibras de coco tiveram todos cerca de 20 mm de assentamento, ou seja, uma redução de 4 mm em relação ao modelo de aterro executado com o solo natural. O SRF foi de 3.47 para os teores de 1.0% e 1.5%, verificando-se um aumento de 0.08 em relação ao valor do SRF do modelo de aterro executado com solo natural. O modelo do aterro executado com o teor de 2.0% de fibras de coco teve um SRF de 3.55 que se traduz um aumento de 0.16 em relação ao valor de SRF do aterro executado com solo natural.

No caso dos modelos executados com taludes laterais com 45° de inclinação, também se verifica uma redução do assentamento em todos os teores simulados. Porém, diferente dos aterros com taludes de 30 e 40° de inclinação. Nestes o SRF reduz nos modelos de aterros executados com solos melhorados com teores de fibras de 0.5, 1.0% e 1.5%, mas volta a aumentar para o teor de 2.0%. Neste caso, verifica-se uma redução de assentamento de 24 mm do modelo de aterro executado com solo natural para 13 mm no modelo executado com solo melhorado com 0.5% de fibras de coco e, o SRF reduziu de 3.38 para 3.23. Os modelos dos aterros executados com solo melhorado com 1.0%, 1.5% e 2.0% de fibras de coco, também tiveram ambos 20 mm de assentamento, ou seja, uma redução de 4 mm em relação ao modelo de aterro executado com solo natural, à semelhança do que se verificou nos aterros com 40° de inclinação dos taludes. Contudo, neste caso, o SRF de 3.23 manteve-se constante para os teores de 0.5%, 1.0% e 1.5%, ou seja, verificou-se uma redução de 0.15 em relação ao modelo de aterro executado com solo natural. O SRF voltou a aumentar de 3.38 correspondente ao modelo executado com solo natural para 3.48 no modelo de aterro executado com mistura do solo natural com 2.0% de fibras.

4.4.2.2. Aterros em solo argiloso saturado

O Quadro 22 ilustra os resultados dos assentamentos e dos fatores de redução de corte obtidos nos modelos de aterros executados com diferentes inclinações dos taludes (30, 40 e 45°), utilizando

os parâmetros do solo argiloso natural saturado e das misturas deste solo com diferentes teores de fibras de coco.

Quadro 22. Resultados do assentamento e fator de corte dos modelos dos aterros em solo argiloso saturado e misturas com fibras.

Taludes dos Aterros	Modelos	Material			Resultados	
		Solo Natural ou Mistura	Solo Argiloso (%)	Fibras (%)	δ (mm)	SRF Crítico
Solo Argiloso Saturado, Taludes com 30° de inclinação	Aterro 4	SN	100	0.0	29	2.99
	Aterro 4.1	SN0.5FC	99.5	0.5	25	3.17
	Aterro 4.2	SN1FC	99	1.0	25	3.17
	Aterro 4.3	SN1.5FC	98.5	1.5	25	3.17
	Aterro 4.4	SN2FC	98	2.0	24	3.22
Solo Argiloso Saturado, Taludes com 40° de inclinação	Aterro 5	SN	100	0.0	30	2.43
	Aterro 5.1	SN0.5FC	99.5	0.5	26	2.60
	Aterro 5.2	SN1FC	99	1.0	26	2.60
	Aterro 5.3	SN1.5FC	98.5	1.5	26	2.70
	Aterro 5.4	SN2FC	98	2.0	25	2.80
Solo Argiloso Saturado, Taludes com 45° de inclinação	Aterro 6	SN	100	0.0	30	2.24
	Aterro 6.1	SN0.5FC	99.5	0.5	26	2.52
	Aterro 6.2	SN1FC	99	1.0	26	2.52
	Aterro 6.3	SN1.5FC	98.5	1.5	26	2.52
	Aterro 6.4	SN2FC	98	2.0	25	2.40

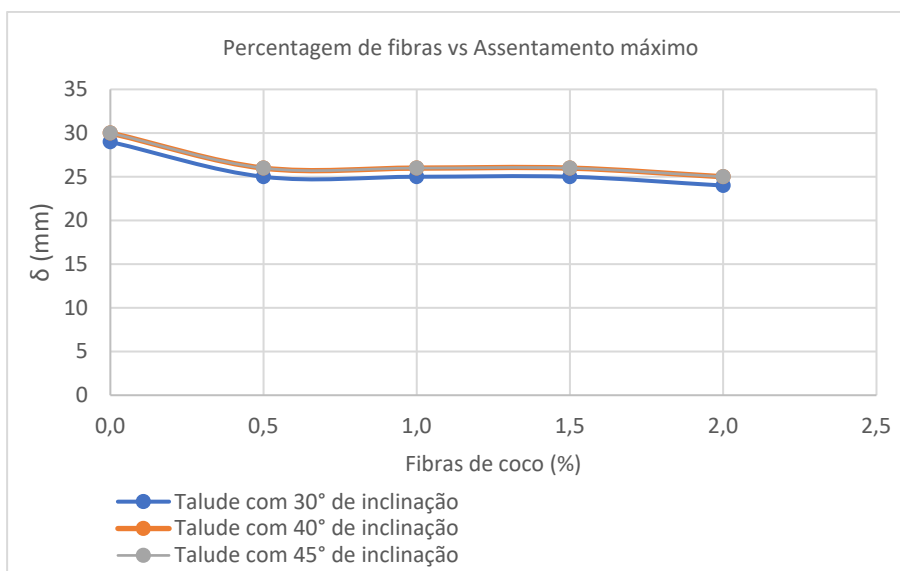


Figura 32. Influência das fibras de coco no assentamento dos aterros em solo argiloso saturado.

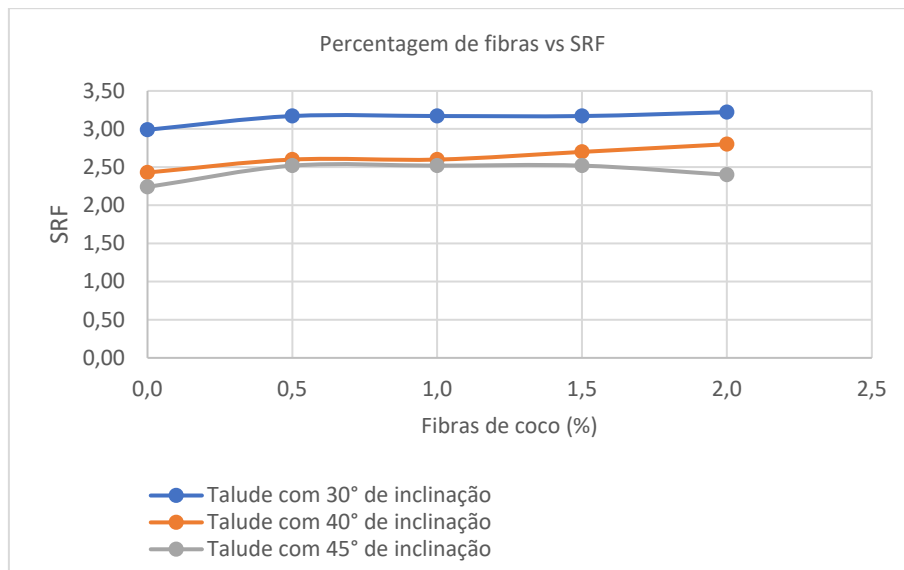


Figura 33. Influência das fibras de coco na segurança dos aterros em solo argiloso saturado

Os modelos dos aterros executados com parâmetros do solo argiloso natural saturado apresentaram valores de assentamento na ordem de 29 mm, 30 mm e 30 mm, correspondentes aos aterros com inclinações de taludes de 30, 40 e 45°, respectivamente, conforme mostra a Figura 32. Verificou-se uma ligeira redução do SRF em função do aumento da inclinação do talude, ou seja, no modelo com taludes de 30° o SRF foi de 2,99, tendo-se verificado uma redução para 2,43 e 2,24 nos casos de modelos com taludes de 40 e 45°, respectivamente.

Em todos os modelos de aterros (com taludes laterais de 30, 40 e 45°), a aplicação de teores de fibras no solo promoveu melhorias significativas no assentamento (Figura 32) e SRF (Figura 33). A utilização dos parâmetros dos teores de 0,5%, 1,0% e 1,5% de fibras no solo natural promoveu uma redução na ordem de 4 mm no assentamento dos aterros, ou seja, no modelo de aterro com taludes laterais de 30° o assentamento reduziu de 29 mm (referente ao solo natural) para 25 mm, e nos modelos de aterros com taludes laterais de 40 e 45° o assentamento reduziu de 30 mm (referente ao solo natural) para 26 mm. Os assentamentos dos modelos executados com 2,0% reduziram 5 mm em todos os modelos com taludes de 30, 40 e 45°, em comparação com o modelo executado com solo natural, ou seja, reduziu de 29 para 24 mm nos aterros com taludes de 30°, e de 30 mm para 25 mm nos aterros com taludes de 40 e 45°. Todos os teores de fibras promoveram aumento do SRF na globalidade modelos de aterros simulados, ou seja, aterros com inclinações de taludes de 30, 40 e 45°.

No caso de modelos de aterros executados com 30° de inclinação dos taludes verificou-se um aumento de 2,99 referente ao SRF do modelo de aterro executado com solo natural para SRF de

3.17 referente aos modelos de aterros executados com solo melhorado com 0.5%, 1.0% e 1.5% de fibras de coco, e de 2.99 para 3.22 referente ao teor de 2.0%. Nos modelos de aterros executados com 40° de inclinação dos taludes, o solo natural apresentou um SRF igual a 2.43 que subiu para 2.60 nos modelos de aterros executados com solo melhorado com 0.5% e 1.0% de fibras de coco, no solo melhorado com teor de 1.5% o SFR aumentou para 2.70 e no solo com teor de fibras de coco de 2.0% o SRF aumentou para 2.80. Nos modelos de aterros executados com taludes a 45°, o modelo de aterro em solo natural apresentou um SRF de 2.24. Este valor aumentou para 2.52 nos aterros executados com solos melhorados com 0.5%, 1.0% e 1.5%, e para 2.40 no aterro executado com solo melhorado com 2.0% de fibras de coco.

4.4.2.3. Aterros em solo arenoso

No Quadro 23 encontram-se apresentados os resultados dos assentamentos e dos fatores de redução de corte dos modelos de aterros executados com diferentes inclinações dos taludes (30, 40 e 45°), utilizando os parâmetros do solo arenoso natural e das misturas deste com diferentes teores de fibras de coco.

Quadro 23. Resultados do assentamento e fator de corte dos modelos dos aterros em solo arenoso e misturas com fibras.

Taludes dos Aterros	Modelos	Material			Resultados	
		Solo Natural ou Mistura	Solo Arenoso (%)	Fibras (%)	δ (mm)	SRF Crítico
Solo Arenoso Taludes com 30° de Inclinação	Aterro 7	SN	100	0.0	753	1.10
	Aterro 7.1	SN0.5FC-25mm	99.5	0.5	335	1.43
	Aterro 7.2	SN0.5FC-50mm	99.5	0.5	330	1.44
Solo Arenoso Taludes com 40° de Inclinação	Aterro 8	SN	100	0.0	1223	0.91
	Aterro 8.1	SN0.5FC-25mm	99.5	0.5	530	1.49
	Aterro 8.2	SN0.5FC-50mm	99.5	0.5	650	1.48
Solo Arenoso Taludes com 45° de Inclinação	Aterro 9	SN	100	0.0	1307	0.87
	Aterro 9.1	SN0.5FC-25mm	99.5	0.5	677	1.49
	Aterro 9.2	SN0.5FC-50mm	99.5	0.5	681	1.50

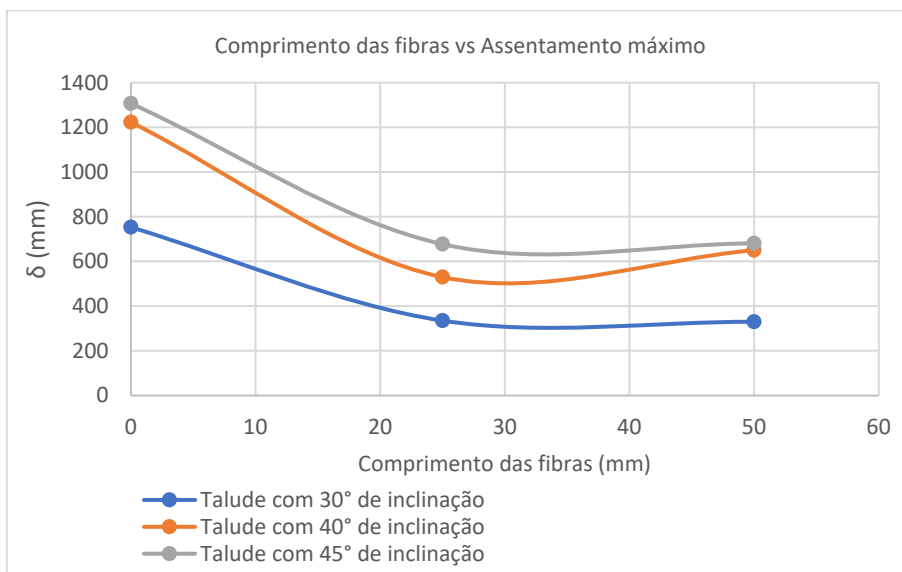


Figura 34. Influência das fibras de coco no assentamento dos aterros em solo arenoso.

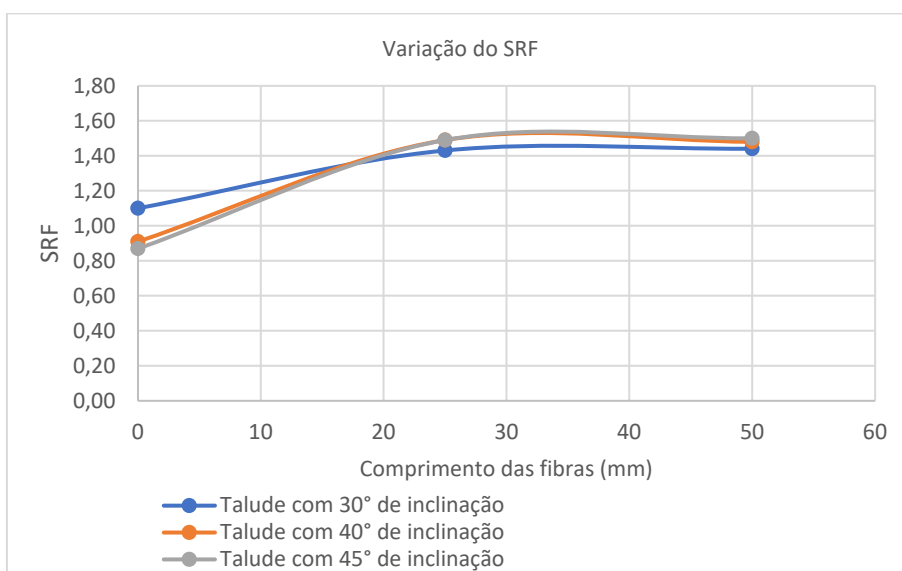


Figura 35. Influência das fibras de coco na segurança dos aterros em solo arenoso.

Nas Figuras 34 e 35 está ilustrada a influência das fibras de coco no assentamento e no valor do SRF dos aterros executados com solo arenoso para diferentes inclinações dos taludes laterais. Conforme a Figura 34, o modelo de aterro executado com solo natural e taludes laterais com inclinação de 30° apresentou um assentamento de 753 mm e um valor de SRF igual a 1.10 (Figura 35). Nas mesmas condições geométricas do aterro, porém executado com o solo melhorado com 0.5% de fibras de coco de 25 mm de comprimento, o assentamento reduz de 753 mm (do solo natural) para 335 mm e o SRF aumenta de 1.10 para 1.43, traduzindo-se numa redução de 418 mm (mais que a metade) no assentamento e um aumento de 0.33 no SRF. Ainda, nas mesmas condições

geométricas, mas com o aterro executado com parâmetros das fibras de 50 mm de comprimento, o assentamento passa de 753 mm para 330 mm e o SRF de 1.10 para 1.44, traduzindo-se numa redução de 423 mm no assentamento e num aumento de 0.34 no SRF.

No modelo de aterro executado com solo natural e taludes laterais com inclinação de 40° verificou-se um aumento no assentamento e uma redução no SRF em relação ao modelo de aterro executado com taludes a 30°. Naquele caso, o assentamento passou de 753 mm para 1223 (figura 33) e o valor do SRF de 1.10 para 0.91 (figura 34). Neste caso (taludes a 40°), o modelo executado com o solo melhorado com 0.5% de fibras de coco com 25 mm de comprimento apresentou um assentamento de 530 mm e um SRF de 1.49, traduzindo-se numa redução do assentamento da ordem de 693 mm e um aumento do valor do SRF na ordem de 0.58. Por outro lado, o modelo de aterro executado com parâmetros de solo melhorado com 0.5% de fibras de coco com 50 mm de comprimento apresentou um assentamento de 650 mm e SRF de 1.48, traduzindo-se numa redução do assentamento da ordem de 573 e um aumento do SRF da ordem de 0.57 em relação ao modelo de aterro executado com solo natural.

O modelo de aterro executado com solo natural e taludes laterais com 45° de inclinação apresentou um aumento no valor do assentamento e uma redução no valor do SRF em relação aos modelos de aterros executados com taludes inclinados a 30 e 40°. Para aqueles modelos, o assentamento passou de 753 e 1223 mm (Figura 34) e SRF de 1.10 e 0.91 (Figura 35) referentes aos modelos de aterros executados com solo natural com taludes a 30 e 40°, respetivamente, para 1307 mm de assentamento e 0.87 para o valor do SRF referentes ao modelo de aterro executado com solo natural com taludes a 45°. Ainda, nesta situação em que os taludes laterais dos modelos de aterros foram executados com uma inclinação de 45°, tanto o modelo de aterro executado com solo melhorado com 0.5% de fibras de coco com 25 mm de comprimento, assim como o de solo melhorado com 0.5% de fibras de coco com 50 mm, apresentaram um assentamento de 683 mm, diferindo no valor de SRF onde as fibras de coco com 25 mm de comprimento mostraram-se melhores com um valor para o SRF de 1.50, ligeiramente superior ao do SRF do modelo executado com fibras com 50 mm de comprimento que apresentou um valor para o SRF igual a 1.47.

Com base na globalidade dos resultados obtidos, percebe-se que, de um modo geral, o teor de 0.5% de fibras de coco promoveu melhoria no assentamento e estabilidade dos taludes dos aterros. Adicionalmente, as fibras de coco com 25 mm de comprimento apresentaram um melhor desempenho em comparação com as de 50 mm de comprimento.

CAPÍTULO V.
Considerações finais

(página propositadamente em branco)

5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

5.1. Conclusões

Partindo do princípio de que quanto menor for o valor do assentamento e maior for o valor do SRF mais segura se torna a infraestrutura implantada num determinado material, pode-se tirar do presente trabalho, as seguintes conclusões:

- de um modo geral, os diferentes teores de fibras de coco testados, tanto nos casos do solo argiloso, assim como no caso do solo arenoso, promoveram melhorias nos assentamentos e no SRF dos modelos das plataformas rodoviárias e dos aterros;
- nos solos argilosos não saturados, as percentagens de 0.5% e 1% de fibras de coco apresentaram melhores desempenhos nos modelos da plataforma com valores de assentamento iguais; embora a redução do assentamento tenha sido de 1 mm, considerada insignificante, este desempenho é ótimo em comparação com os valores obtidos com as percentagens de 1.5% e 2%, visto que promoveram um aumento de assentamento da ordem de 3 mm em relação ao assentamento verificado no modelo executado com solo natural;
- no caso dos aterros, na maioria dos modelos simulados com parâmetros do solo argiloso não saturado e da sua mistura com diferentes teores de fibras, constatou-se um diferencial médio de 4 mm entre os modelos elaborados com parâmetros naturais e os resultantes da simulação com parâmetros dos compósitos; porém, o teor de 0.5 % foi o que apresentou melhor desempenho, visto que, nos aterros com inclinações de 40 e 45°, o teor de 0.5% apresentou assentamentos de 16 mm e 13 mm embora com uma ligeira redução do fator de redução de corte, contra 24 mm de assentamento apresentados pelos modelos elaborados com parâmetros do solo natural e 20 mm obtidos nos modelos simulados com os teores de 1%, 1.5 % e 2%;
- nos modelos simulados com parâmetros do solo argiloso saturado também não se verificou grande variação no valor do assentamento da plataforma, tendo em conta que o diferencial entre o valor de assentamento do modelo elaborado com parâmetros do solo natural e os modelos resultantes da simulação com parâmetros das misturas foi de 1 mm passando de 5 mm para 4 mm; diferente do que se verificou no caso do solo argiloso não saturado, para

o qual o valor do assentamento não variou com o aumento do teor de fibras, tendo-se mantido os 4 mm para todos teores testados nos modelos da plataforma;

- no caso dos aterros, a tendência foi a mesma constatada para os modelos das plataformas rodoviárias, ou seja, diferente dos com solo argiloso não saturado; aqui houve variação do assentamento entre os modelos do solo natural e os dos compósitos na ordem de 4 mm; esta variação foi a mesma para todos teores testados, resultando no mesmo valor de assentamento;
- relativamente ao solo arenoso, as fibras de coco não tiveram nenhum efeito no assentamento dos modelos da plataforma pois, o valor do assentamento obtido no modelo resultante da simulação com parâmetros do solo natural manteve-se nos modelos elaborados com parâmetros dos materiais resultantes da mistura; porém, houve um ligeiro ganho na segurança da infraestrutura, tendo o valor do SRF passado de 2.12 no caso do solo natural para cerca de 2.60 nos materiais compósitos;
- no caso dos aterros, estes apresentaram valores de assentamento muito elevado tanto nos modelos elaborados com parâmetros do solo natural, bem como os elaborados com parâmetros das misturas, valores que podem ser explicados pela simplificação considerada para os modelos; contudo, houve uma redução no valor do assentamento bastante expressiva, cuja variação média entre assentamento do modelo de solo natural e dos compósitos foi da ordem de 400 mm que, apesar de ser um valor elevado, houve melhoria do comportamento do solo, pois verificou-se uma redução de mais da metade do valor do assentamento obtido nos modelos elaborados com parâmetros do solo natural; verificou-se também um aumento expressivo do fator de redução de corte o que permite concluir que as fibras de coco promoveram o incremento da estabilidade dos taludes dos aterros; por outro lado, a variação o comprimento das fibras não teve grande influência nos resultados, pelo que, por questões de otimização, conclui-se nesta análise, o comprimento ótimo das fibras é o de 25 mm.

Com estas constatações, globalmente, conclui-se que a percentagem ótima de fibras é de 1% do peso do solo natural a ser reforçado. Vale a pena ainda ressaltar que esta análise é mais qualitativa, uma vez que se utilizou mesmo valor de módulo de deformabilidade tanto para solo natural, bem como para os compósitos, facto que seguramente, contribuiu para as ligeiras discrepâncias verificadas sobretudo no solo argiloso não saturado. Caso se dispusesse valores mais fiáveis dos módulos de deformabilidade as conclusões poderiam ser expressivas.

Um dos objetivos específicos deste trabalho foi perceber a dinâmica do aproveitamento dos resíduos de coco em Moçambique. Com base nas pesquisas feitas, constatou-se que o aproveitamento de resíduos de fibras de coco em moçambique é um desafio pois, a deposição descontrolada continua sendo uma prática que precisa ser revertida o mais cedo possível, através de implantação de indústrias de processamento deste resíduo não aproveitado e que contribui para a degradação do meio ambiente.

5.2. Aplicação das conclusões retiradas

Tendo por base as conclusões acima destacadas apresenta-se seguidamente, a título meramente indicativo, um cálculo simplificado do retorno espectável da proposta de inclusão das fibras de coco nas plataformas de obras viárias em Moçambique.

Naquele tipo de obras é muito frequente o recurso a soluções de base de pavimento aditivadas com cimento em percentagens da ordem dos 4 a 6% do peso da mistura valores que conduzem ao recurso a cerca de 100kg de cimento/m³ de aterro. Considerando que esta quantidade, facilmente pode ser reduzida em 50% mediante a incorporação de fibras de coco numa percentagem da ordem de 0,5 a 1% da massa de solo seca, ou seja cerca de 15kg de fibras/ m³ seguidamente avalia-se o limite superior do preço das fibras a ser praticado em Moçambique para manter a competitividade da solução proposta. Assim sendo:

- Solução actual: $5\% \times 2200 \text{kg} \times 0,12 \text{€} = 13,2 \text{€/m}^3$.

- Solução proposta: $2,5\% \times 2200 \text{kg} \times 0,12 \text{€} + 0,75\% \times 2200 \text{kg} \times \text{PU fibras €}/\text{kg} < 13,2 \text{€/m}^3$

Obtém-se que o preço das fibras em Moçambique deverá ser inferior a 0,40€/kg (aproximadamente 27 meticais) para assegurar a viabilidade da solução. Faz-se notar que este valor é cerca de 30% a 50% do custo das fibras de coco a granel comercializadas em Portugal. Contudo, tem-se a convicção que aquele valor seja facilmente alcançado em Moçambique pelas razões atrás expostas, nomeadamente, a estrutura da economia do setor e a grande disponibilidade de material. Os possíveis incentivos ambientais também poderão contribuir para a viabilização económica da tecnologia.

5.3. Desenvolvimentos Futuros

Apesar da utilização de fibras no geral ser uma técnica de reforço antiga, o seu aprimoramento tem ganhado especial atenção nos últimos tempos por parte de diferentes investigadores, sobretudo os que atuam no ramo da engenharia e da geotecnia. Contudo, são poucos os estudos realizados com fibras de coco como material de reforço de solos, embora este material seja de fácil acesso em regiões tropicais. Neste sentido, no caso de Moçambique, devido à disponibilidade das fibras de coco e a suscetibilidade do país a eventos severos e conseqüente vulnerabilidade ao arrastamento de solos e/ou erosão das estradas, como estudos futuros, recomenda-se um estudo de caso (ensaios de laboratório) com solos predominantes em moçambique e as respetivas misturas de solo com diferentes teores de fibras de coco, visto que neste trabalho houve limitações para realização dos ensaios. O futuro estudo, dentre outras etapas, deverá consistir basicamente em:

- caracterização minuciosa dos solos predominantes no país, de modo a permitir adoção de uma solução que vá de encontro às características observadas;
- caracterização das fibras de coco das variedades produzidas em Moçambique para apurar as suas propriedades mecânicas, de modo a perceber o seu comportamento isolado, antes de misturá-las com qualquer tipo de solo;
- desenvolvimento de estudos de caracterização laboratorial mais aprofundados do comportamento dos solos locais quando melhorados, não só com fibras de coco, mas também, com a combinação de fibras de coco e cimento Portland. A sugestão do uso do cimento Portland deve-se ao facto de o mesmo, assim como as fibras de coco, ser acessível no mercado moçambicano visto que é produzido localmente nas províncias de Nampula (norte), Sofala (centro) e Maputo (sul). Além disso, em vários estudos laboratoriais realizados e em obras de pavimentação rodoviárias executadas com solos melhorados com cimento Portland, ficou comprovado que este ligante confere aos solos maior resistência à compressão e à tração, tanto de solos argilosos assim como de solos arenosos, bem como garante de coesão aparente aos últimos;
- complemento dos estudos laboratoriais com modelações numéricas que potenciem a avaliação de possíveis soluções de melhoramento do comportamento das estruturas rodoviárias moçambicanas quando construídas por recurso ao melhoramento dos solos ocorrentes na sua envolvente.

Referências bibliográficas

(página propositadamente em branco)

Referências Bibliográficas

- Ates, A. (2016). Mechanical properties of sandy soils reinforced with cement and randomly distributed glass fibers (GRC). *Composites Part B: Engineering*, 96: 295–304. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.049>
- Barreto, T.M. (2019). Influência da adição de copolímero de butadieno e estireno modificado no comportamento mecânico de uma areia. Pontifícia Universidade Católica do Rio De Janeiro - PUC-Rio, Brasil. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.52791>
- Cabral, A.E.D.L., Lima, G.F., Lima, N.M.S., Silva, R.M., & Batista, L.S. (2018). Análise de melhoramento de solos com adição de cal hidratada para utilização em base e sub-base de pavimentos. In: *Actas do Congresso Técnico Científico Da Engenharia e Da Agronomia – CONTECC’2018 21 a 24 de Agosto de 2018 – Maceió-AL, Brasil*.
- Casagrande, M.D.T. (2005). Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. <http://hdl.handle.net/10183/5345>
- Correia, A.G., Barros, R., Prates, M., Luís, S., & Fonseca, P. (n.d.). Tratamento de Solos (Terra Aditivada) em Vias de Comunicação. Resumos das Jornadas sobre Construção com Terra Aditivada.
- Costa, A.F.T.H. & S., Sityá, L.V., & Machado, L.F.M. (2019). Análise da Adição de Pó De Brita No Melhoramento de um Solo, com Vistas à Pavimentação. *Exatas e Tecnológicas*, 3:12. <https://doi.org/10.17564/2359-4942.2019v3n3>
- DER/SP. (2012). Manual Básico de Estradas e Rodovias Vicinais: Planejamento, projeto, construção e operação (DER (ed.); Volume I).
- Feuerharmel, M.R. (2000). Comportamento de Solos Reforçados com Fibras de Polipropileno. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/5345>
- Gomes, A., Neves, J., Fortunato, E., & Parente, M. (2021). A Geotecnia nos Pavimentos e Vias-Férreas e Prospetivas para a Era Digital. *Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 152:113–141.
- Gonçalves, H.B.B., Oliveira, F.H.L., Quariguasi, B. J.F., & Aguiar, M.F.P.(2017). Estudo de reforço de solo para pavimentos rodoviários com a utilização de fibra de polipropileno e cimento. In: *Actas da 20a. Reunião Anual de Pavimentação - 20a. RPUAt, Florianópolis*.
- Gonçalves, L.D., & Araújo, D. (2015). Estudo do Comportamento de solos reforçados para aplicação em obras geotécnicas. análise do comportamento de um solo arenoso reforçado com fibras de coco. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Brasil (relatório).
- Huang, J., & Han, J. (2009). 3D coupled mechanical and hydraulic modeling of a geosynthetic-reinforced deep mixed column-supported embankment. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(4), 272–280. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.01.001>
- Júnior, A.I.O., Jucá, J.F.T., & Ferreira, J.A. (2018). Influência da adição de fibra de coco (*coco nuciferas*) na compressibilidade de um solo argiloso. In: *XIX Congresso Brasileiro de Mecânica Dos Solos e Engenharia Geotécnica. Geotecnia e Desenvolvimento Urbano COBRAMSEG 2018 – 28 de Agosto a 01 de Setembro, Salvador, Bahia, Brasil*.
- Lacerda, M., & Leitão, F. (2021). Desafios e oportunidades da economia circular: o caso dos resíduos do coco verde. *Informe GEPEC*, 25(2):164–181. <https://doi.org/10.48075/igepec.v25i2.25709>
- Marques, G. L.D.O. (2018). Pavimentação (Notas de Aulas). Universidade federal de juiz de fora.
- Martins, C.R., & Junior, L.A.J. (2014). Produção e comercialização de coco no Brasil frente ao comércio internacional: panorama 2014. Comitê Local de Publicações Da Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1(1):53. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/897921>

-
- Martins, F., Antunes, V., & Crucho, J. (2022). Reforço de um solo com plasticidade elevada com fibras de cânhamo e estabilização química para camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. In: Actas do 10.º Congresso Rodoferroviário Português, 1–10. <https://www.ulusofona.pt/feg>
- Motta, T.G. (2018). Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras naturais (Sisal, Carauá e Coco). Trabalho de Conclusão de Curso (graduação), Universidade de Brasília, Brasil. <https://www.bdm.unb.br/handle/10483/21453>
- Natário, P.J.G. (2017). Obras de melhoramento e reforço de solos. Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 139:77–98.
- Neto, F.C., Ronaldo, S., Araújo, F.J., & Cruz, L.M.O. (2010). Possíveis formas de aproveitamento dos resíduos oriundos do coco (*Cocos nucifera L.*). In: Actas do Congresso Internacional de Tecnologias Para o Meio Ambiente, p. 1–6.
- Neto, P.S. L., Gonçalves, H.B.B., Oliveira, F.H.L., & Aguiar, M.F.P. (2016). Estudo de utilização de fibras de polipropileno como reforço em solo para a pavimentação rodoviária. In: Actas da 45ª RAPV – Reunião anual de pavimentação 19º enacor – encontro nacional de conservação rodoviária 1º fórum rodoviário, de trânsito e de mobilidade.
- Nicholson, P.G. (2014). Soil improvement and ground modification methods. Butterworth Heinemann, Elsevier, 455 p. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-02804-9>
- Pastana, C. E. T. (2006). Pavimentações de Estradas II (Anotações de Aula; p. 87). FEAT – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Tecnologia, Marília, Brasil. <https://docplayer.com.br/45672957-Pavimentacoes-de-estradas-ii.html>
- Pinto, A.R.A.G. (2008). Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo. Pontifícia Universidade Católica do Rio De Janeiro - PUC-RIO, Brasil. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.12096>
- Quariguasi, J.B.F., Gonçalves, H.B.B., Oliveira, F.H.L., & Aguiar, M.F.P. (2018a). Estudo da capacidade de suporte da estabilização de solos para pavimentação rodoviária. In: Actas do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica Dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasil.
- Quariguasi, J.B.F., Gonçalves, H.B.B., Oliveira, F.H.L., & Aguiar, M.F.P. (2018b). Estudo da capacidade de suporte da estabilização de solos para pavimentação rodoviária. In: Actas do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasil.
- Rojas, J.W.J. (2015). Estabilização de Solos. F. catalográfica elaborada por M.P.N.C. 10/1440 (ed.).
- Santana, I., Silva, T. T., & Mulder, A.P. (2020). Coqueiro (*cocos nucifera L.*) e produtos alimentícios derivados: uma revisão sobre aspectos de produção, tecnológicos e nutricionais. In: Tecnologia de Alimentos: Tópicos Físicos, Químicos e Biológicos - Volume 2 (pp. 80–101). Editora Científica Digital. <https://doi.org/10.37885/200800949>
- Silva, R.R.C., Tavares, M.S., Nascimento, A.M.A., Ferraudo, B. C., & Rodrigues, R.L. (2020). Avaliação dos parâmetros mecânicos e físicos de solos moles através da injeção de colunas de argamassa associada a geodrenos verticais. Brazilian Journal of Development, 6(12):103490–103506. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n12-740>
- Silva, J.A., Bello, M.I.M.C., & Ferreira, S.R.M. (2020). Comportamento geotécnico de um solo expansivo estabilizado com cinza de casca de arroz e cal hidratada. Journal of Environmental Analysis and Progress, 5(2):232–256. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.2.2020.3205.232-256>
- Silva, N.A.B.S., Casagrande, M.D.T., & Vasconcelos, N.F. (2019). Comportamento mecânico de um compósito solo-polímero. GEOCENTRO 2019, Brasília/DF, Brasil.
- Sotomayor, J.M.G., & Casagrande, M.D.T. (2015). Estudo experimental de solo reforçado com fibra

de coco utilizando ensaios de placa de grande magnitude para aplicação em obras geotécnicas. In: Congresso Panamericano de Mecânica de Suelos e Ingeniería Geotécnica 1:11.

Souza Júnior, A., Silvani, C., Tenório, E. A.G., Patricio, J.D., Scariot, K.A.L., & Lucena, L.C.D.F.L. (2021). Comparação entre as técnicas de estabilização química e reforço com geossintético na melhoria da resistência ao cisalhamento de solo com baixa capacidade de suporte. *Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica Do IFPB*, 57: 134. <https://doi.org/10.18265/1517-0306a2021id4419>

Vasconcelos, L. (2014). Breve apresentação sobre os recursos geológicos de Moçambique. *Comunicações Geológicas*, 101:869–874.

Sítios da Internet Consultados

- <https://www.dadosmundiais.com/africa/mocambique/ciclones.php>. (Consultado a 20 de Fevereiro de 2023)
- <https://www.publico.pt/2019/03/23/mundo/noticia/estrada-beiramaputo-reabre-domingo-ajuda-vai-comecar-chegar-depressa-1866576> (Consultado a 20 de Fevereiro de 2023).
- <https://www.standardbank.co.mz/por/Informacao-Institucional/Noticias-e-Eventos/PME-usa-coco-para-preservar-o-ambiente> (Consultado a 20 de Setembro de 2023).
- <https://www.dw.com/pt-002/mo%C3%A7ambique-estradas-continuam-cortadas-por-cao-do-freddy/a-65391038> (Consultado a 21 de Setembro de 2023).
- <https://www.diarioeconomico.co.mz/2021/05/18/economia/desenvolvimento/banco-mundial-promete-monitorar-o-processo-de-reconstrucao-pos-ciclone/> (Consultado a 20 de Setembro de 2023).
- <https://www.icrc.org/pt/document/ela-foi-enterrada-e-esta-em-paz> (Consultado a 20 de Setembro de 2023).
- <https://pt.slideshare.net/roselsa/os-solos-e-climas-de-moambique> (Consultado a 20 de Setembro de 2023)
- <https://mundoeducacao.uol.com.br/biologia/coco.htm> (Consultado a 07 de Outubro de 2023)
- <https://casavogue.globo.com/arquitetura/paisagismo/noticia/2021/03/como-cultivar-coqueiro-anao-no-jardim.ghtml> (Consultado em 07 de Outubro de 2023)
- <https://www.floresefolhagens.com.br/coqueiro-cocos-nucifera/> (Consultado a 07 de Outubro de 2023)
- https://www.leroymerlin.com.br/manta-de-fibra-de-coco-coquim-fofa_1567446471#descricao-do-produto (Consultado a 07 de Outubro de 2023)
- <https://www.ntcbrasil.com.br/mantas/biomanta-fibra-de-coco/> (Consultado a 07 de Outubro de 2023)
- <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (Consultado a 8 de Outubro de 2023)
- <https://integritymagazine.co.mz/arquivos/1072> (Consultado a 10 de Outubro de 2023)
- <https://opais.co.mz/moradores-da-cidade-de-maputo-questionam-finalidade-da-taxa-de-lixo/> (Consultado a 12 de Outubro de 2023)

Anexos

(página propositadamente em branco)

Anexo 1. Modelos do comportamento da plataforma rodoviária simulada com parâmetros do solo argiloso não saturado e dos materiais compósitos.

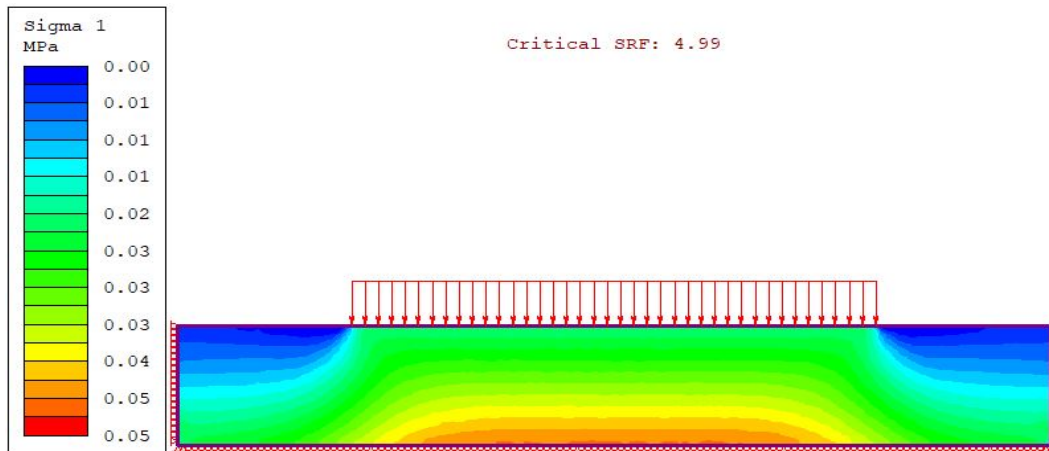


Ilustração 1. Tensão vs fator de segurança no modelo do comportamento da plataforma rodoviária executada com solo argiloso não saturado.

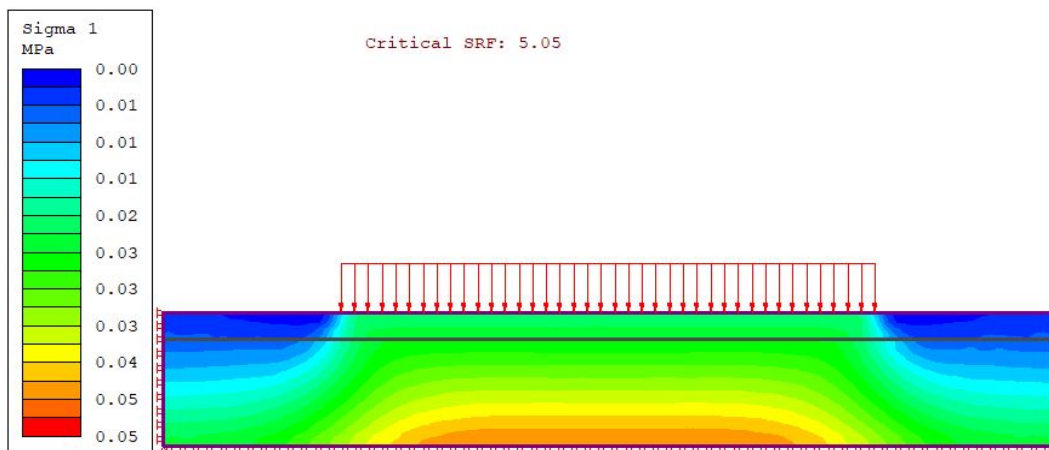


Ilustração 2. Tensão vs fator de segurança no modelo do comportamento da plataforma rodoviária executada com solo argiloso não saturado, com camada superficial de 0.30 m de espessura reforçada com 0.5% de fibras de coco.

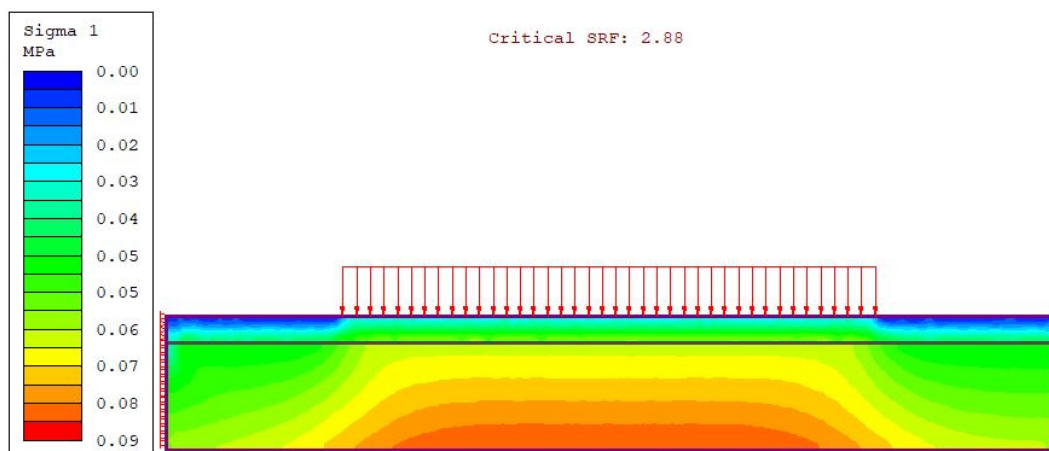


Ilustração 3. Tensão vs fator de segurança no modelo do comportamento da plataforma rodoviária executada com solo argiloso não saturado, com camada superficial de 0.30 m de espessura reforçada com 2% de fibras de coco.

Anexo 2. Modelos do comportamento da plataforma rodoviária simulada com parâmetros do solo argiloso saturado e dos materiais compósitos.

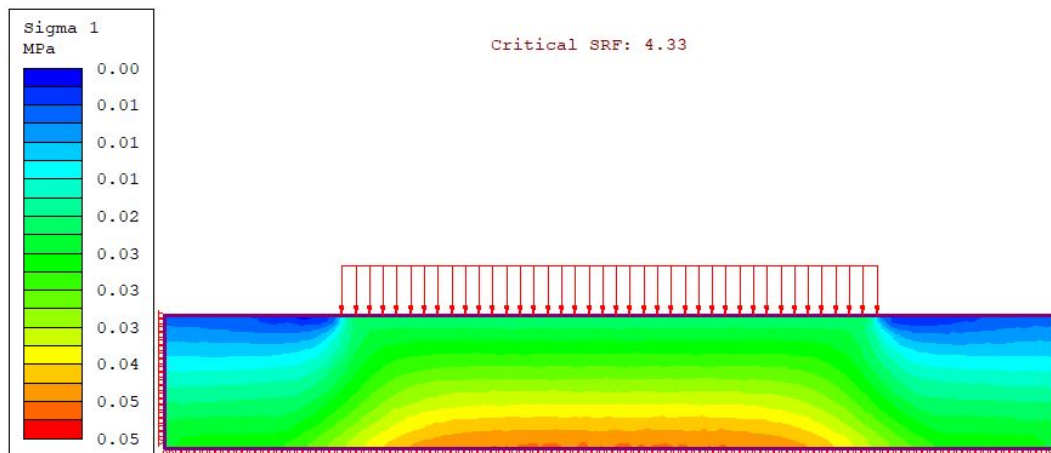


Ilustração 4. Tensão vs fator de segurança no modelo do comportamento da plataforma rodoviária executada com solo argiloso saturado.

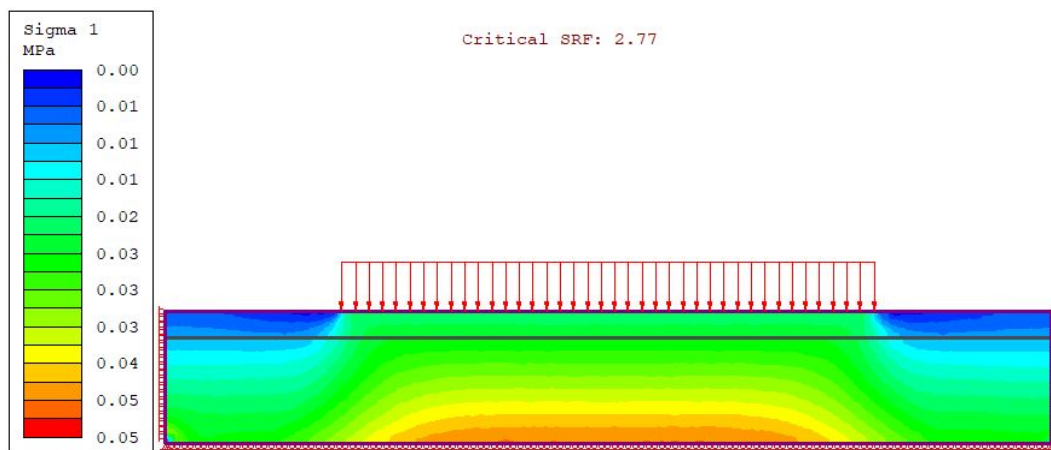


Ilustração 5. Tensão vs fator de segurança no modelo do comportamento da plataforma rodoviária executada com solo argiloso saturado, com camada superficial de 0.30 m de espessura reforçada com 0.5% de fibras de coco.

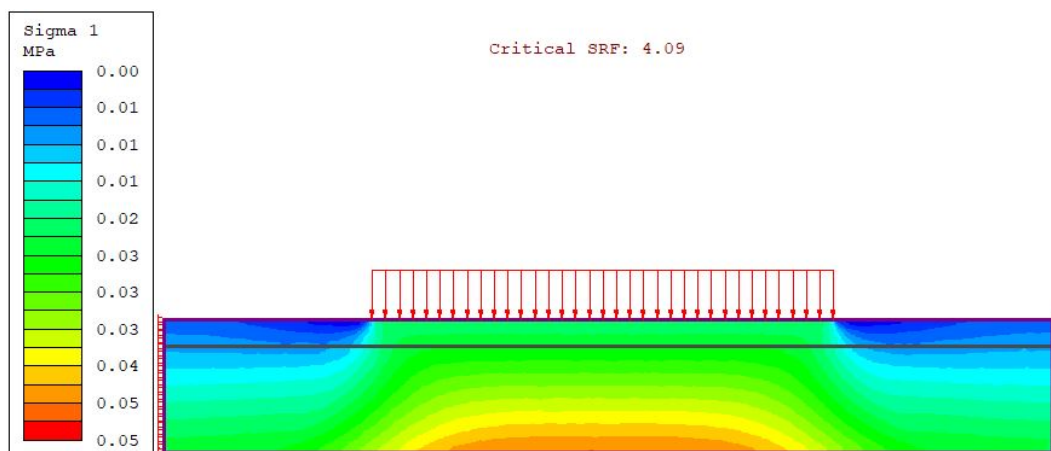


Ilustração 6. Tensão vs fator de segurança no modelo do comportamento da plataforma rodoviária executada com solo argiloso saturado, com camada superficial de 0.30 m de espessura reforçada com 2% de fibras de coco.

Anexo 3. Modelos do comportamento da plataforma rodoviária simulada com parâmetros do solo arenoso e dos materiais compósitos.

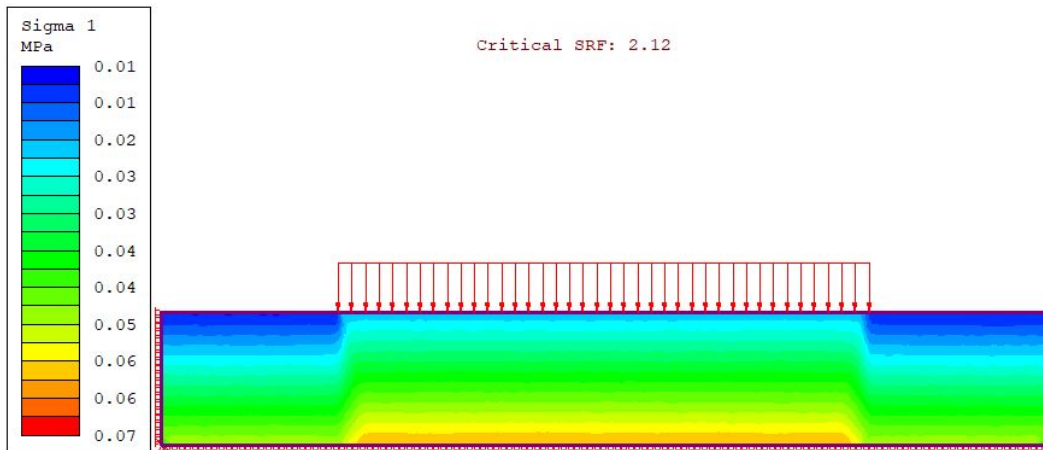


Ilustração 7. Tensão vs fator de segurança no modelo do comportamento da plataforma rodoviária simulada com parâmetros do solo arenoso.

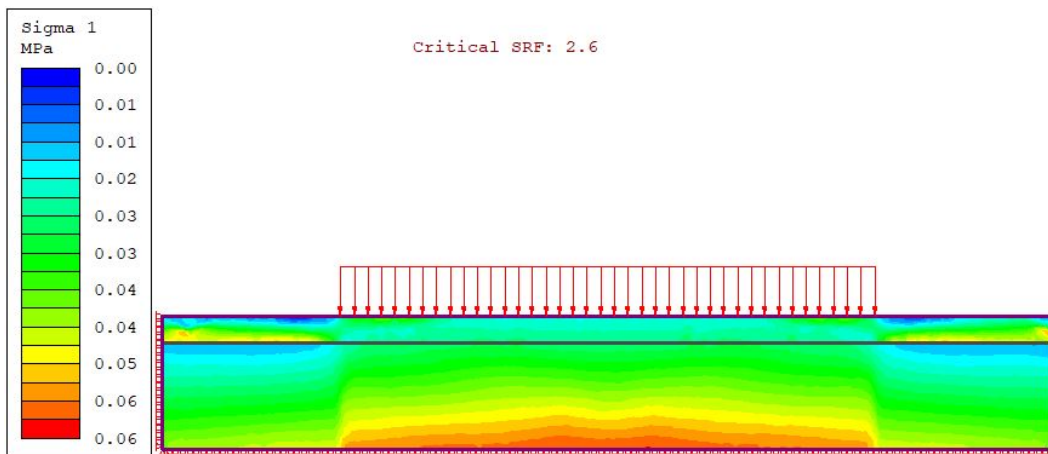


Ilustração 8. Tensão vs fator de segurança no modelo do comportamento da plataforma rodoviária simulada com parâmetros do solo arenoso, com camada superficial de 0.30 m de espessura reforçada com 0.5% de fibras de coco com 25 mm de comprimento.

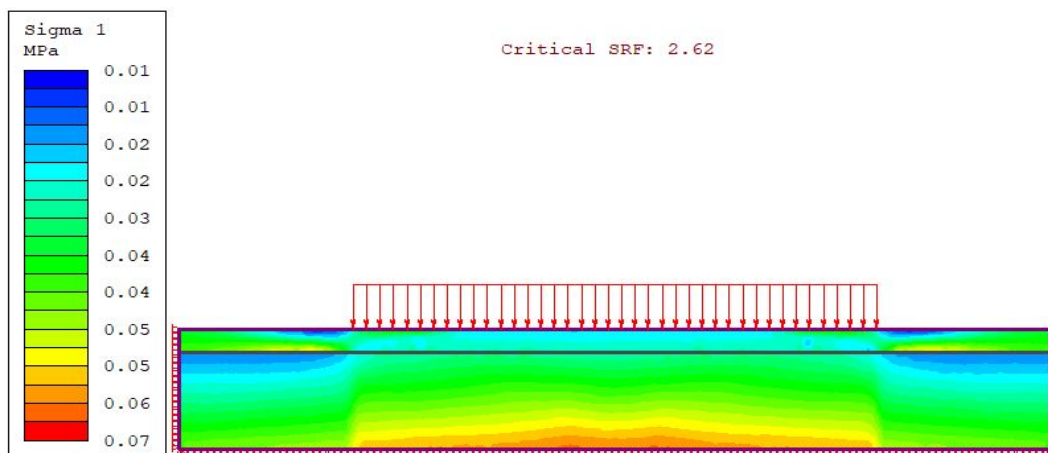


Ilustração 9. Tensão vs fator de segurança no modelo do comportamento da plataforma rodoviária simulada com parâmetros do solo arenoso, com camada superficial de 0.30 m de espessura reforçada com 0.5% de fibras de coco com 50 mm de comprimento.

Anexo 4. Modelos do comportamento de aterros na pavimentação rodoviária simulados com parâmetros do solo argiloso não saturado e material compósito.

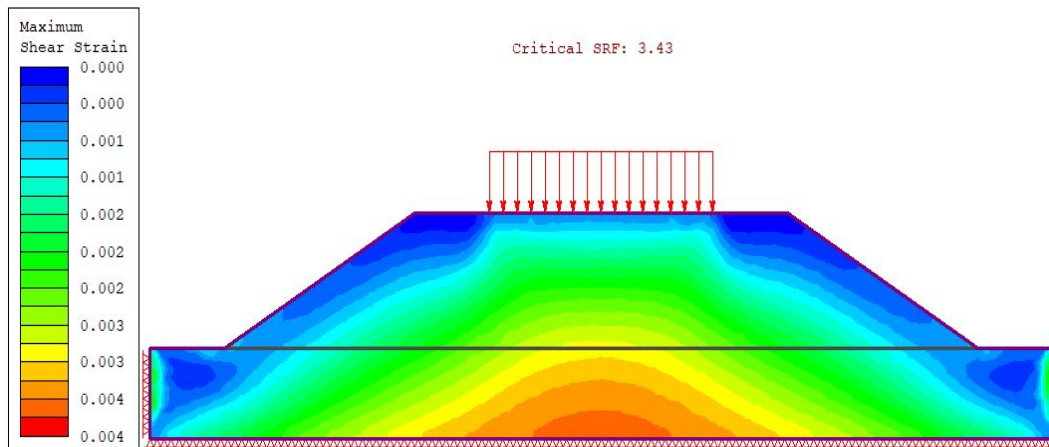


Ilustração 10. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 30° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso não saturado.

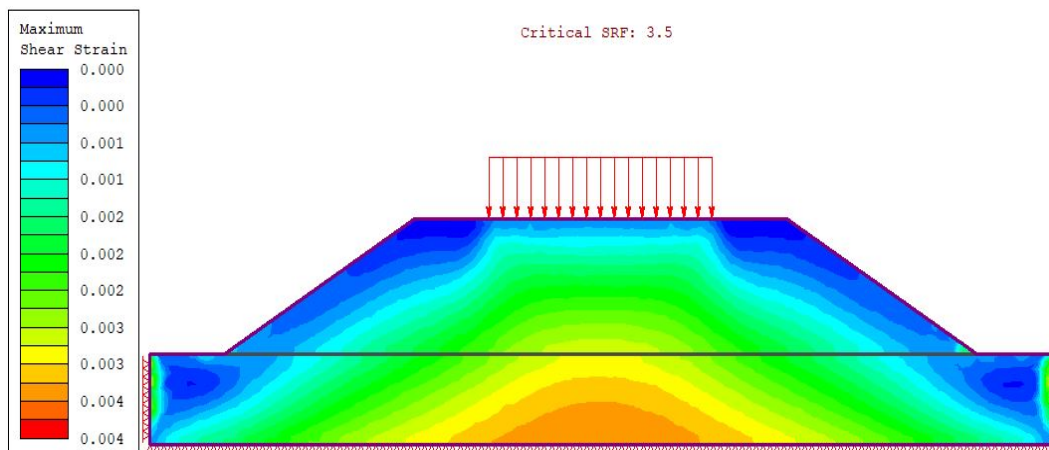


Ilustração 11. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 30° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso não saturado reforçado com 0.5% de fibras.

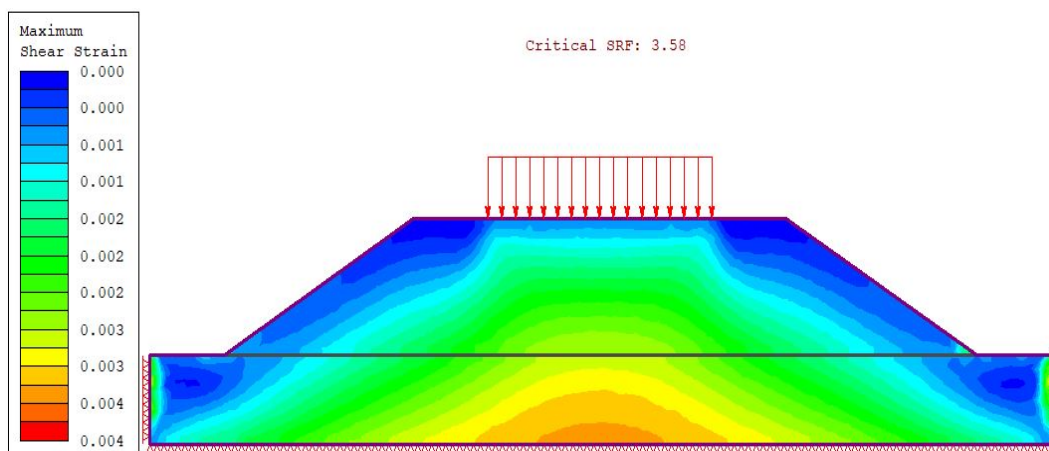


Ilustração 12. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 30° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso não saturado reforçado com 2% de fibras.

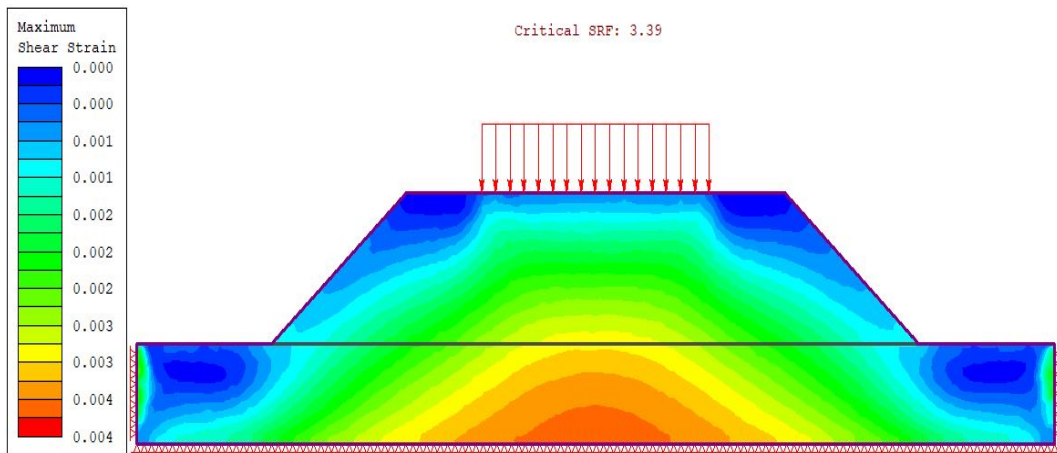


Ilustração 13. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 40° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso não saturado.

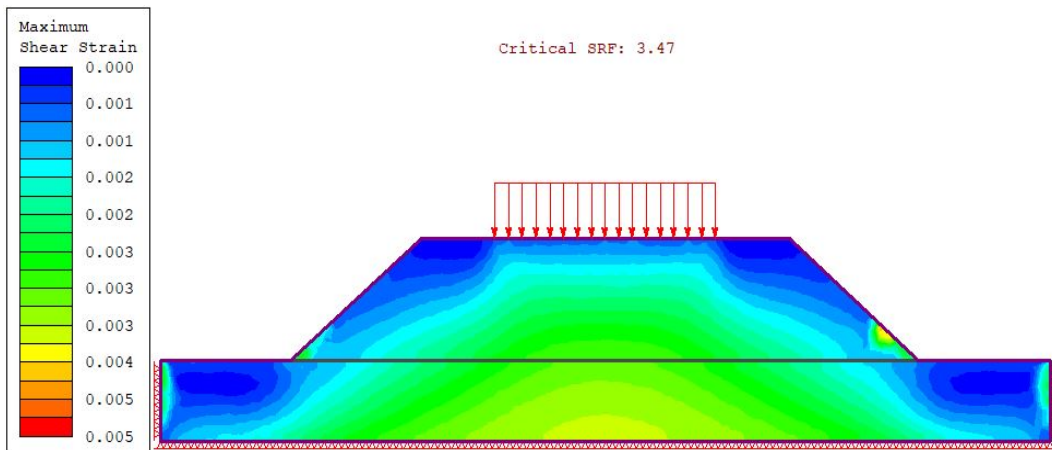


Ilustração 14. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 40° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso não saturado reforçado com 0.5% de fibras.

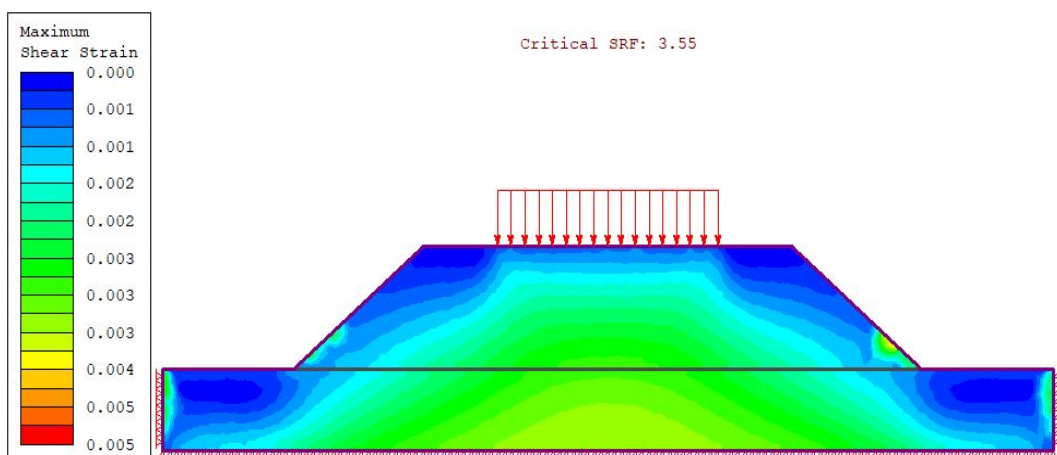


Ilustração 15. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 40° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso não saturado reforçado com 2% de fibras.

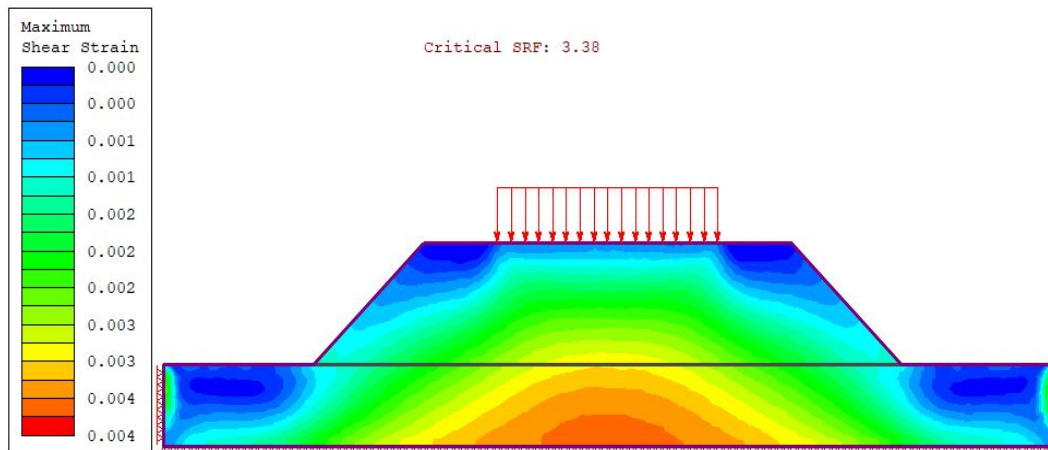


Ilustração 16. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 45° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso não saturado.

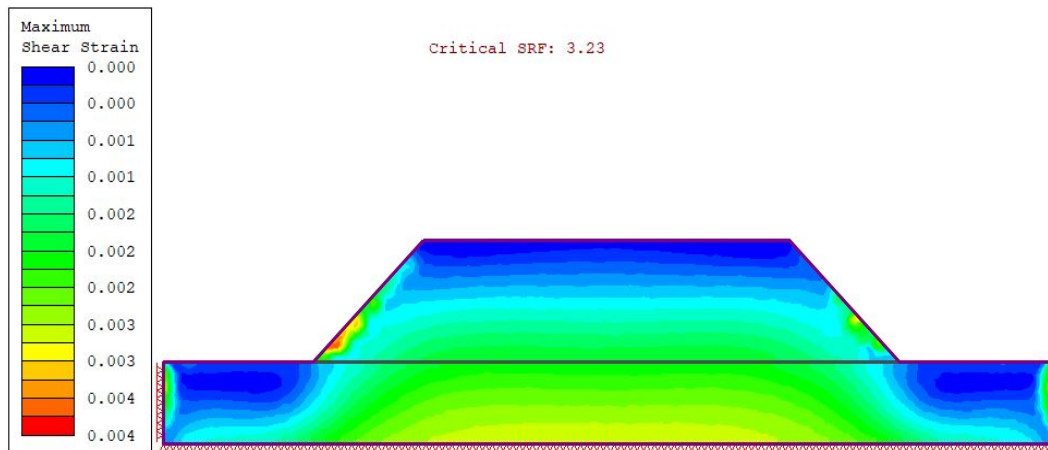


Ilustração 17. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 45° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso não saturado reforçado com 0.5% de fibras.

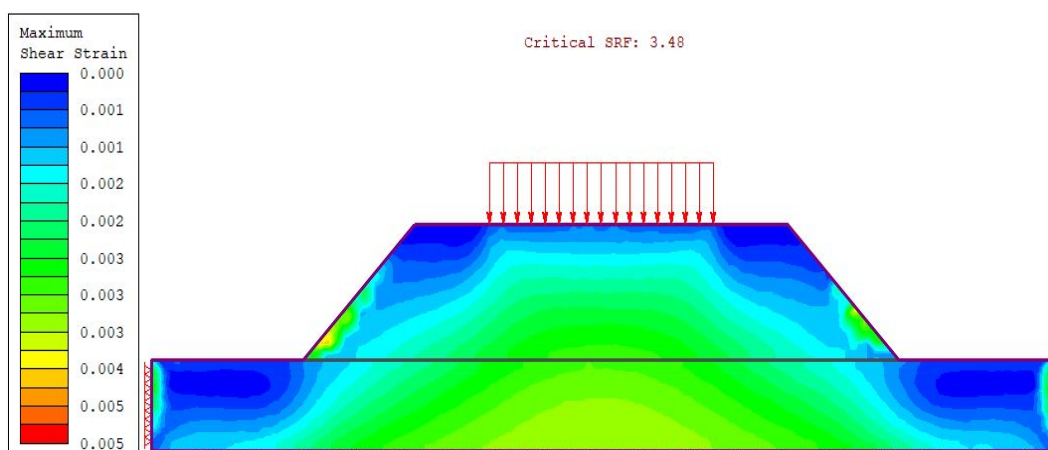


Ilustração 18. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 45° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso não saturado reforçado com 2% de fibras.

Anexo 5. Modelos do comportamento da plataforma rodoviária simulada com parâmetros do solo argiloso saturado e material compósito.

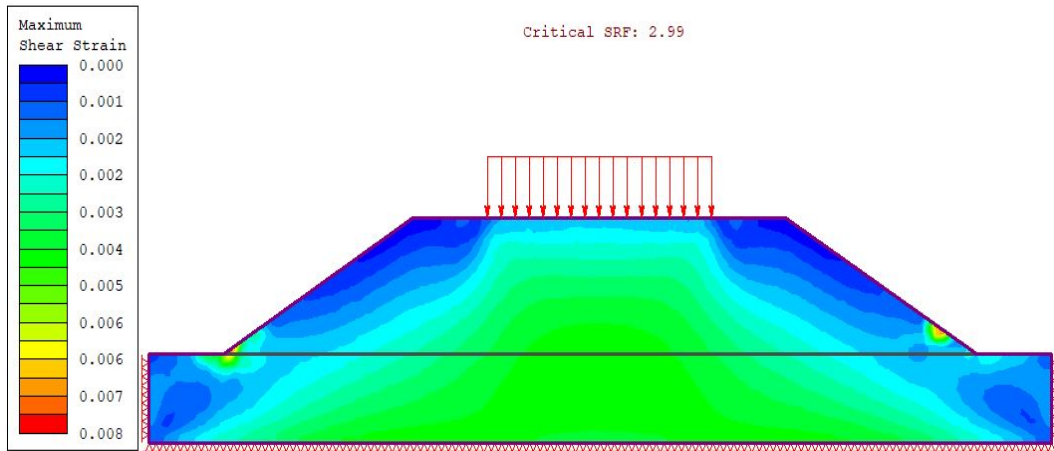


Ilustração 19. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 30° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso saturado.

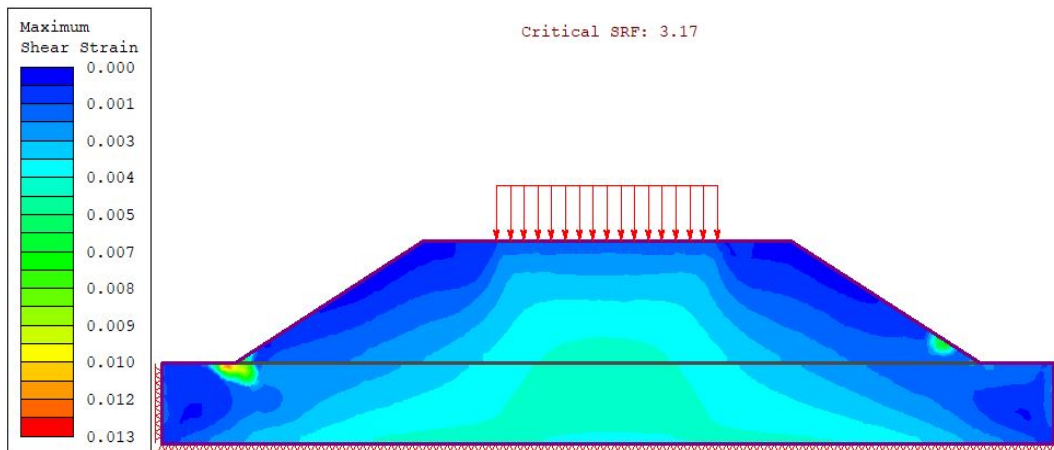


Ilustração 20. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 30° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso saturado reforçado com 0.5% de fibras.

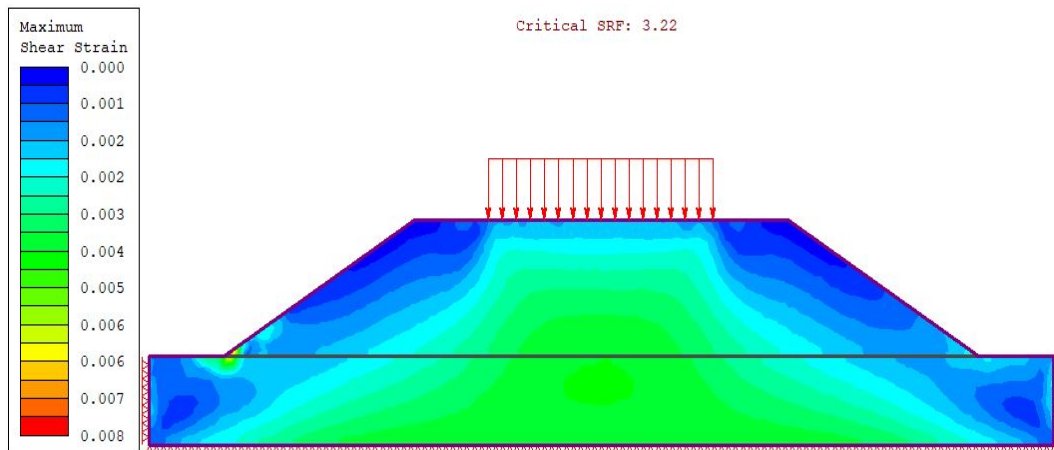


Ilustração 21. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 30° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso não saturado reforçado com 2% de fibras.

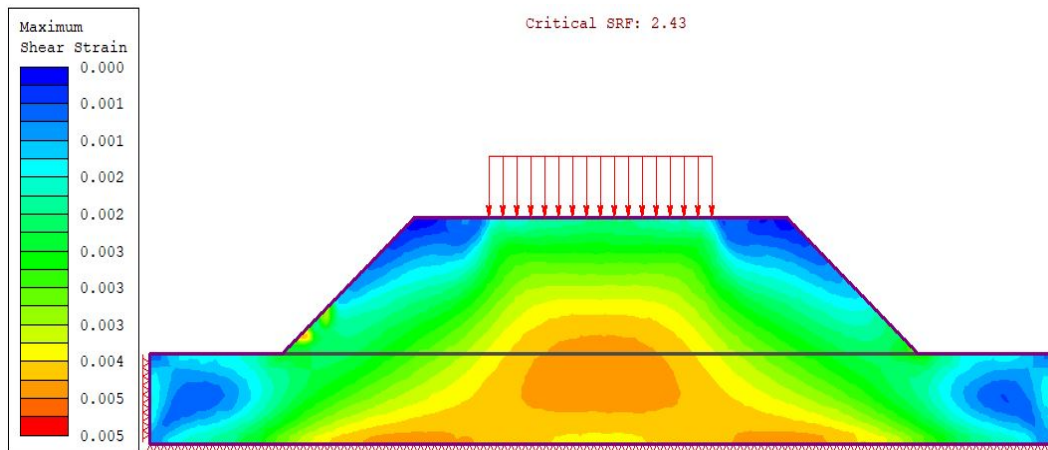


Ilustração 22. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 40° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso saturado.

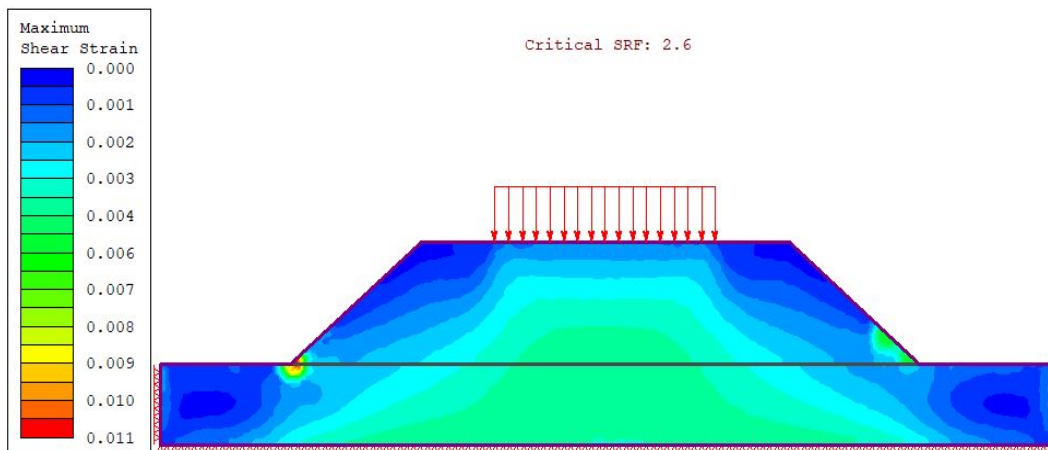


Ilustração 23. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 40° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso saturado reforçado com 0.5% de fibras.

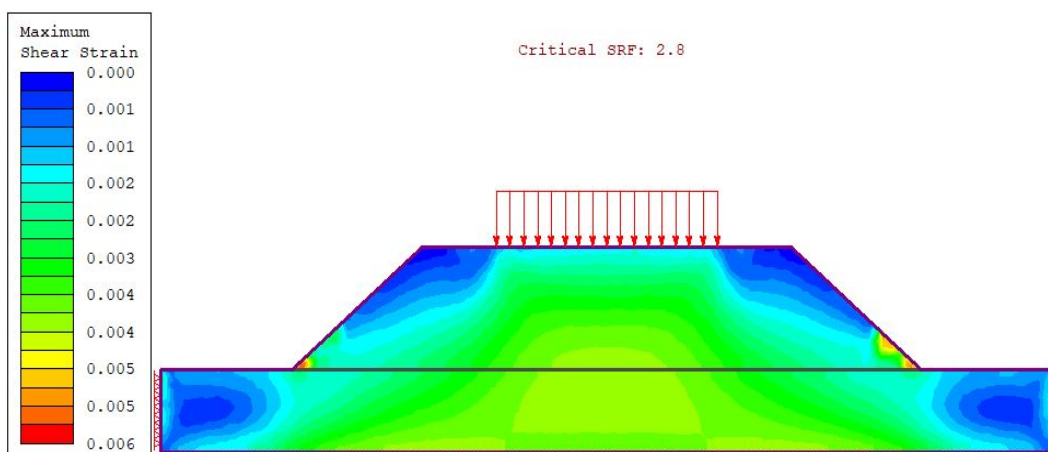


Ilustração 24. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 40° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso não saturado reforçado com 2% de fibras.

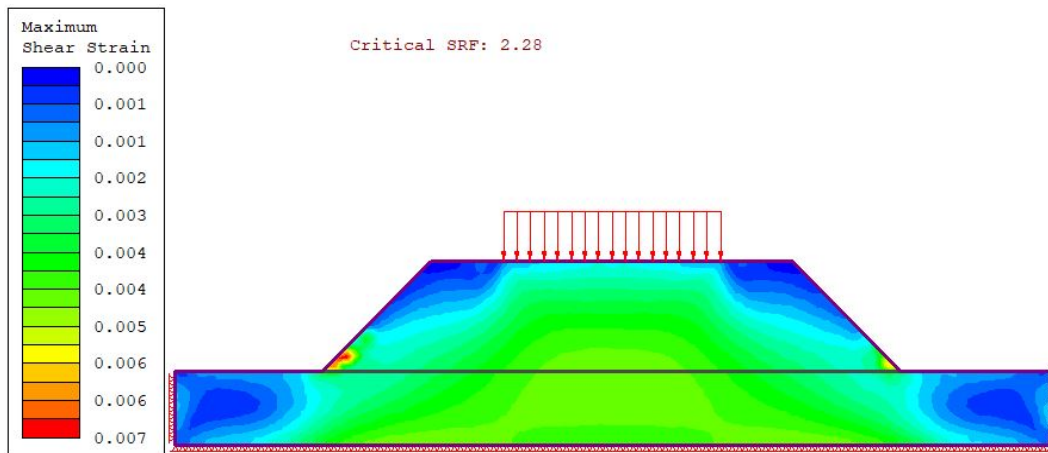


Ilustração 25. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 45° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso saturado.

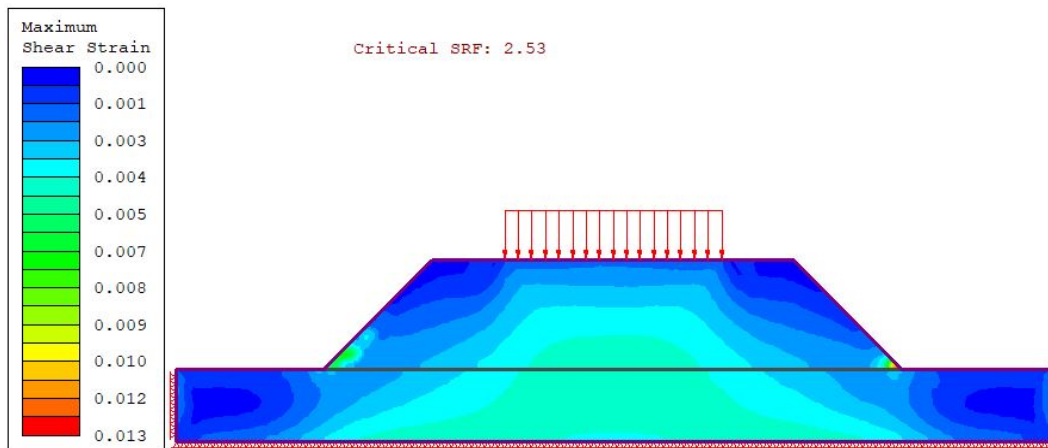


Ilustração 26. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 45° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso saturado reforçado com 0.5% de fibras.

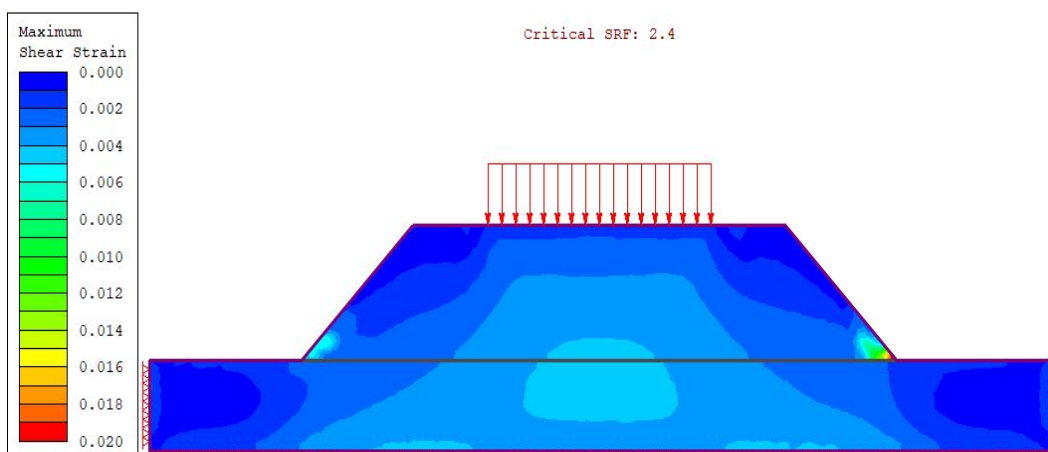


Ilustração 27. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 45° de inclinação, simulado com parâmetros do solo argiloso não saturado reforçado com 2% de fibras.

Anexo 6. Modelos do comportamento da plataforma rodoviária simulada com parâmetros do solo arenoso e material compósito.

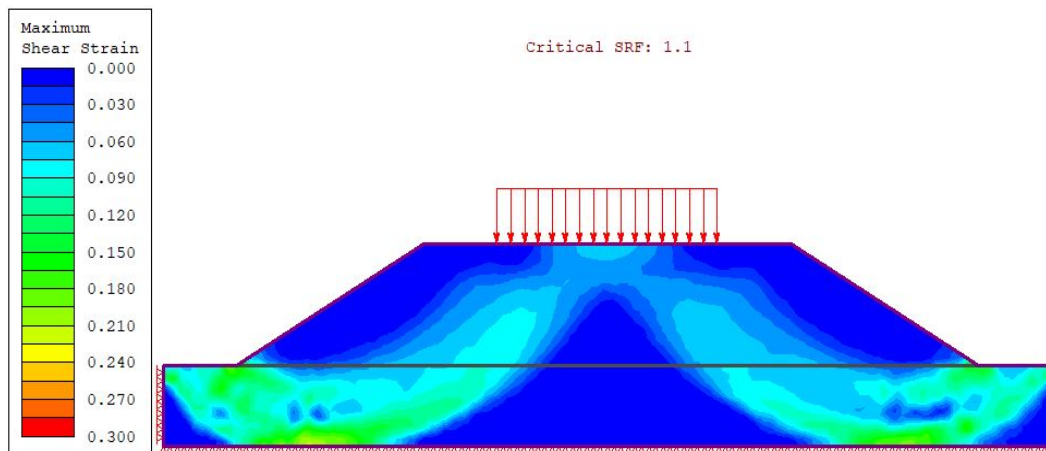


Ilustração 28. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 30° de inclinação, simulado com parâmetros do solo arenoso natural.

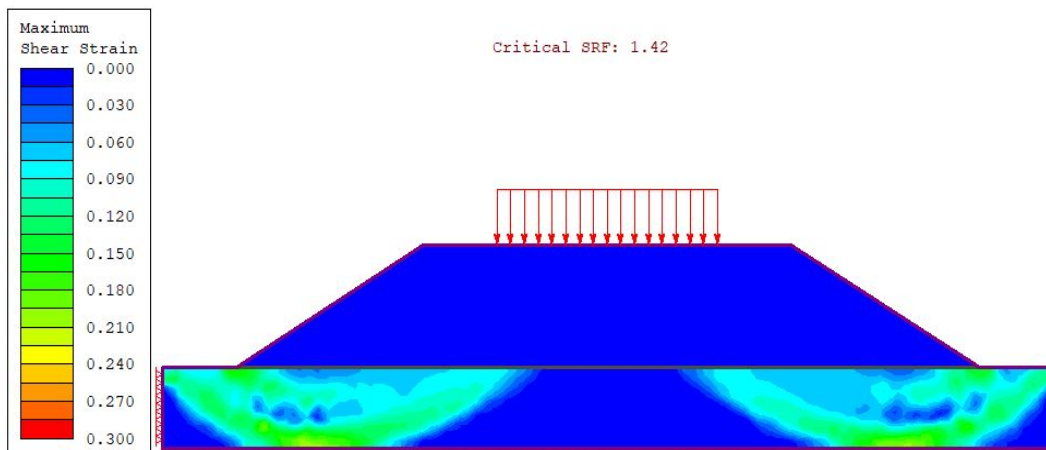


Ilustração 29. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 30° de inclinação, simulado com parâmetros do solo arenoso reforçado com 0.5% de fibras de coco com 25 mm de comprimento.

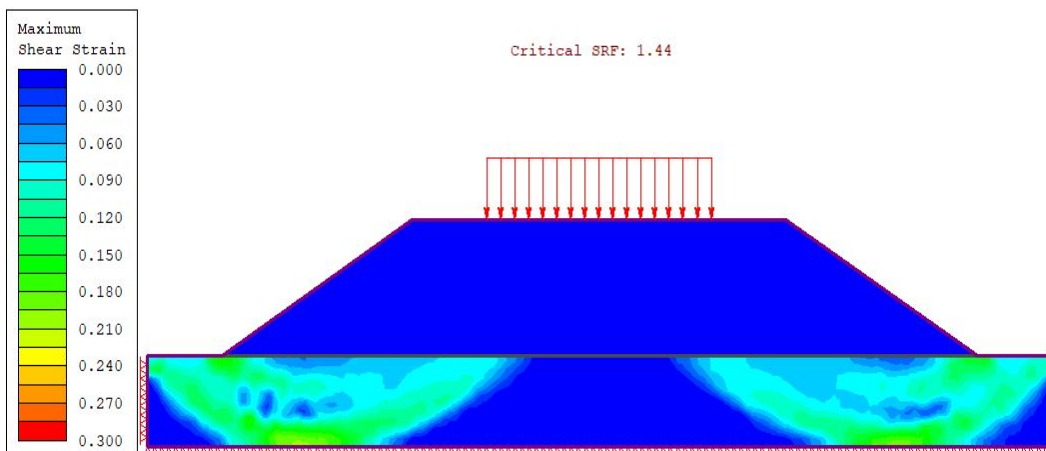


Ilustração 30. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 30° de inclinação, simulado com parâmetros do solo arenoso reforçado com 0.5% de fibras de coco com 50 mm de comprimento.

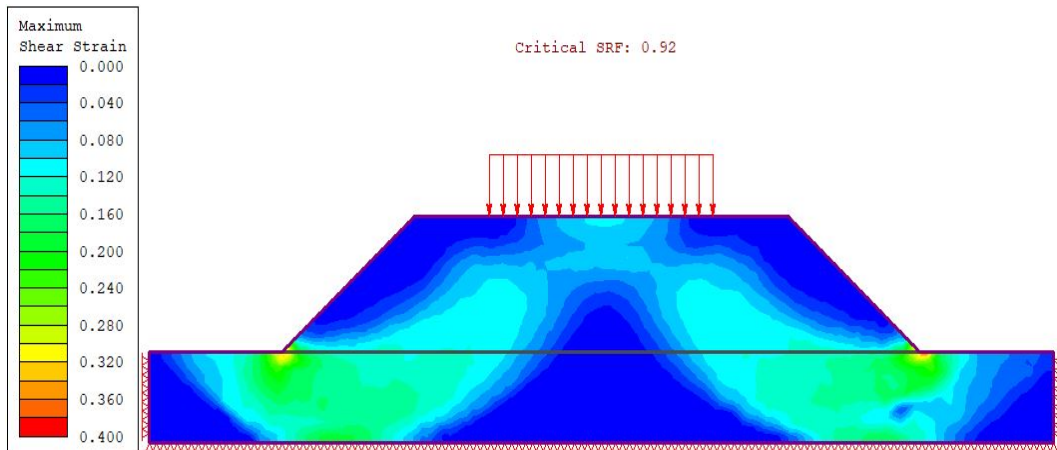


Ilustração 31. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 40° de inclinação, simulado com parâmetros do solo arenoso natural.

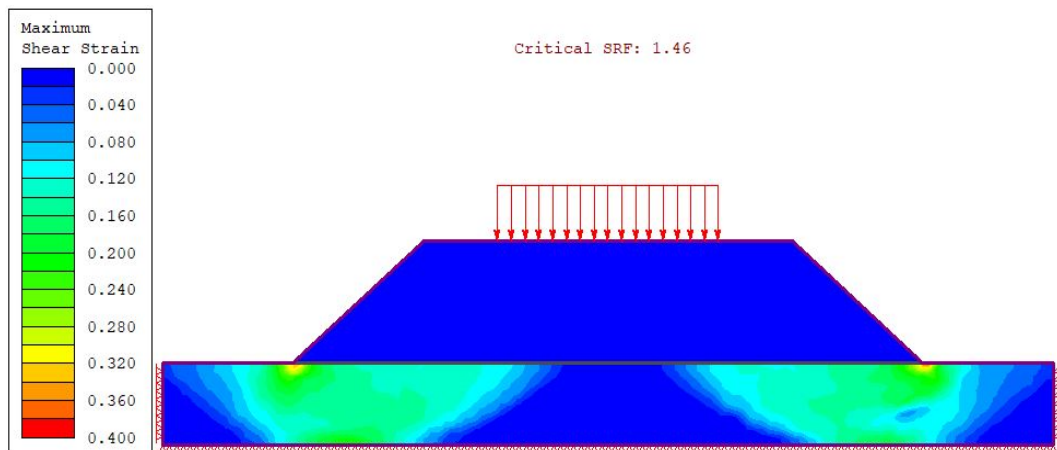


Ilustração 32. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 40° de inclinação, simulado com parâmetros do solo arenoso reforçado com 0.5% de fibras de coco com 25 mm de comprimento.

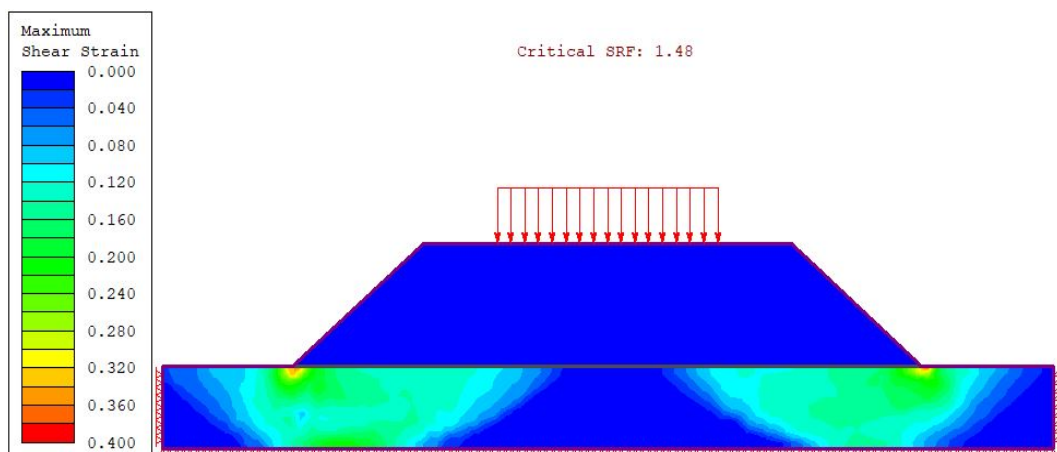


Ilustração 33. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 40° de inclinação, simulado com parâmetros do solo arenoso reforçado com 0.5% de fibras de coco com 50 mm de comprimento.

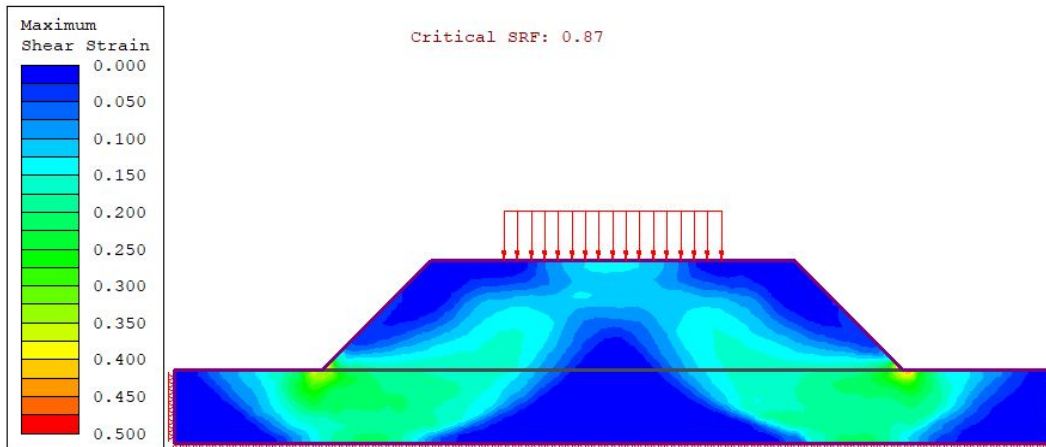


Ilustração 34. Máxima deformação por corte do modelo de aterro simulado com parâmetros do solo arenoso natural e taludes com 45° de inclinação

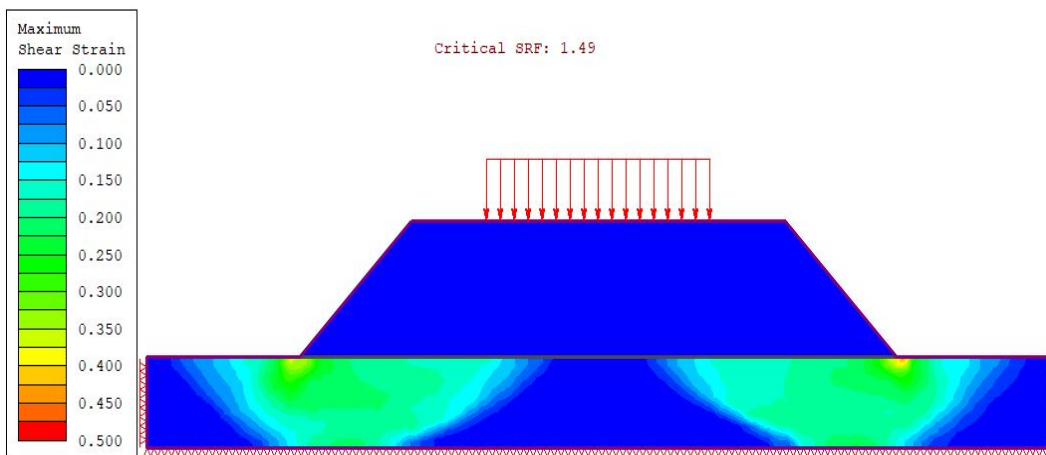


Ilustração 35. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 45° de inclinação, simulado com parâmetros do solo arenoso reforçado com 0.5% de fibras de coco com 25 mm de comprimento.

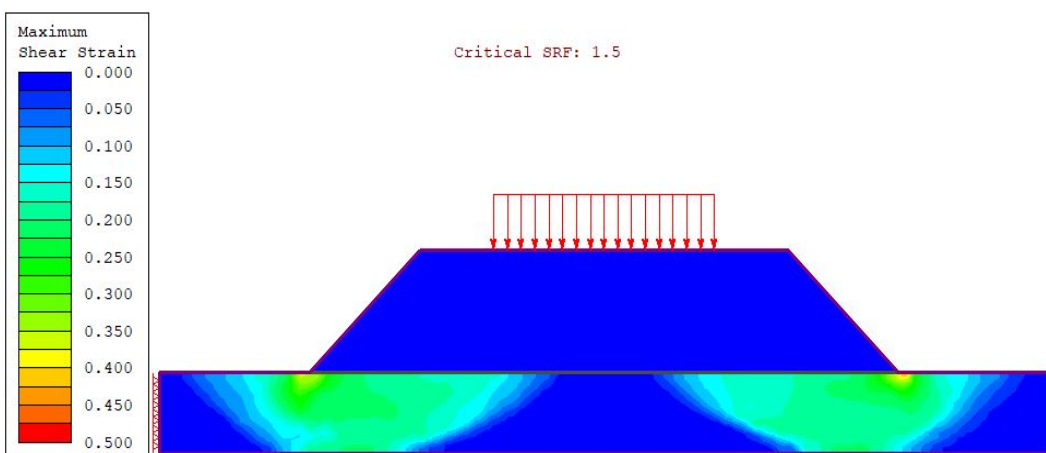


Ilustração 36. Máxima deformação por corte do modelo de aterro com taludes de 45° de inclinação, simulado com parâmetros do solo arenoso reforçado com 0.5% de fibras de coco com 50 mm de comprimento.